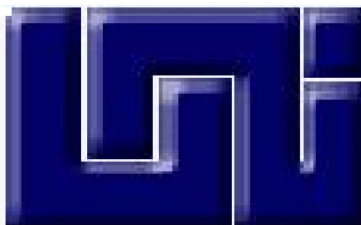


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



Obtención de un cemento base Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar y Pumicita activado alcalinamente por medio de Sulfato de Aluminio e Hidróxido de Calcio

Trabajo de Diploma presentado por:

Br. César Enrique Rivera Meza

Para Optar a Título de:

Ingeniero Químico

Tutor:

M. en C. Léster Javier Espinoza Pérez

Managua, Febrero de 2017

Dedicatoria

Este trabajo monográfico esta dedicado:

A mi madre Seira Meza por ser una mujer luchadora que siempre está a mi lado, en cada momento de vida, por forjar en mi una persona dedicada, responsable, por el apoyo que me brinda en cada una de mis metas. Por saber educarme y ser un pilar principal en mi formación humana y educativa.

A mis hermanas por estar siempre conmigo, y apoyarme en cada momento de mi vida.

A mi papá César Rivera, por todo su apoyo para la realización de este trabajo monográfico.

A mis amigos y amigas que he cosechado a lo largo de mi vida estudiantil, por brindarme su valioso tesoro de la amistad, por sus consejos y apoyo durante mi estancia en la universidad.

Agradecimientos

Agradezco a todas aquellas personas que me brindaron sus valiosos aportes y dedicaron tiempo directamente e indirectamente para elaboración de este trabajo investigativo.

Al M en C Léster Espinoza por haberme guiado, confiado y transmitido conocimientos a lo largo de todo este tiempo para la realización de mi trabajo monográfico.

Al Msc José Canales por la confianza depositada en mi persona, por ser un maestro a lo largo de mis estudios universitarios, por sus consejos durante la realización de esta investigación.

A la Facultad de Tecnología de la Construcción por facilitarme el uso de Laboratorio de Materiales y Suelo para el desarrollo de la parte experimental de la investigación.

Al personal de los laboratorios de Química General, Ingeniería Ambiental, Alimentos y Operaciones Unitarias, por el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo.

Al Ing. Juan Alonso por su valiosa colaboración en la realización de los análisis de FT-IR, ya que sin su apoyo no hubiese sido posible realizar dicho estudio.

Al Ingenio Monte Rosa por haber proporcionado la CBCA utilizada en la investigación.

Al Ing. Marcos Pomares y al Br. Junior Matamoros, por su apoyo brindado durante todo el tiempo de la realización de esta investigación.

A todas aquellas personas que me apoyaron de una u otra manera a lo largo de este trabajo.

Gracias a todos...

Resumen

La presente investigación tuvo como principal propósito obtener una base cementante a partir de dos desechos: ceniza de bagazo de caña (desecho industrial) y pómez pulverizada (escoria natural). Se utilizó como activador alcalino una mezcla de sulfato de aluminio/sodio y cal. Todas las mezclas se prepararon de acuerdo a un diseño ortogonal Taguchi L_{25} y se sometieron a pruebas físico-mecánicas, pruebas químicas de penetración de carbonatos e identificación de posibles productos de reacción mediante FT-IR.

La fórmula óptima se determinó por medio de la gráfica de efectos principales a partir de los datos promedio de la resistencia a compresión, dando como resultado que la P.24 tenía mejor desempeño mecánico con una RMC de 7.80MPa. Es evidente que la RMC aumenta al disminuir la cantidad de ceniza en el compósito, incluso a valores de cero. Otro de los aspectos importantes a destacar es el comportamiento de la fluidez en dependencia de la cantidad de CBCA presente en la mezcla, indicando que si ésta disminuye la fluidez incrementa.

Una vez identificada la formulación de mayor RMC y la segunda mejor formulación, se analizó el comportamiento de sus morteros frente a la carbonatación, obteniendo como resultado que la fórmula óptima es atacada con mayor facilidad por el carbonato registrando penetración de 3 a 5 cm de profundidad.

El análisis de FT-IR fue fundamental en esta investigación, ya que se identificó que a partir de las pastas analizadas se originaron productos de reacción tales como etringita y tobermorita.

Estudios más amplios y con empleo de técnicas de caracterización avanzadas son necesarios para poder dar una utilidad a estos desechos que se generan en cantidades significativas en nuestro país.

Opinión del Catedrático Guía

El presente trabajo de tesis ha sido desarrollado de manera notable por el Br. César Enrique Rivera Meza en las instalaciones de la Universidad Nacional de Ingeniería. En este trabajo, el Br. Rivera ha formulado un cemento a base de desechos de la industria azucarera y escorias naturales, ha caracterizado las propiedades físico mecánicas más importantes y más aún ha identificado posibles productos de reacción mediante técnicas avanzadas de caracterización.

Para lograr lo anteriormente mencionado, el Br. Rivera Meza ha puesto en práctica los conocimientos que adquirió a lo largo de la carrera, entre ellos métodos estadísticos y de diseños de experimentos, conocimientos de química inorgánica, método científico, entre otros. Como futuro Ingeniero Químico, ha puesto en práctica la transformación de materias primas (desechos en este caso) a productos útiles a la sociedad en general (materiales de construcción), aportando una alternativa más al desarrollo sustentable de la sociedad en pro del medio ambiente.

Por todo lo anterior, y a mi criterio, la tesis presentada por el Br. Rivera Meza reúne las condiciones necesarias para ser presentada y defendida ante el tribunal examinador correspondiente, a fin de que se le otorgue el título de Ingeniero Químico.

Atentamente:



M. en C. Léster Javier Espinoza Pérez

Profesor Titular y Tutor de Tesis

Índice

Dedicatoria	i
Agradecimientos.....	ii
Resumen	iii
Opinión del Catedrático Guía	iv
Índice de Tablas y Figuras	vii
Índice de Anexos	viii
I. Introducción	1
II. Antecedentes	2
III. Justificación	3
IV. Objetivos.....	4
V. Marco Teórico.....	5
5.1. Puzolanas.....	5
5.1.1. Clasificación.....	5
5.2. Piedra Pómez.....	5
5.2.1. Usos de Piedra Pómez.	6
5.3. Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar.....	6
5.3.1. Usos de la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar	8
5.4. Cemento compósito.....	8
5.5. Mortero.....	9
5.6. Pasta	9
5.7. Tiempo de fraguado	9
5.8. Curado.....	9
5.8.1. Temperaturas de curado.....	9
5.9. Activación alcalina.....	9
5.9.1. Tipos de activadores.....	9
5.10. Resistencia mecánica a la compresión	10
5.11. Absorción de agua	10
5.12. Carbonatación.....	10
5.12.1. Técnica de indicador de pH	10
5.13. Productos de reacción	11
5.14. Técnica para la identificación de productos de reacción.....	11
5.14.1. Espectroscopia Infrarroja	11

VI.	Metodología	12
6.1.	Materiales:.....	12
6.1.1.	Pumicita	12
6.1.2.	Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA).....	13
6.1.3.	Agua de mezclado	15
6.1.4.	Agregado fino	16
6.1.5.	Cal Hidratada	17
6.1.6.	Sulfato de Aluminio y Sodio	18
6.2.	Método.	18
6.2.1.	Variables de Estudio	18
6.2.2.	Arreglo Experimental	19
6.2.3.	Desarrollo Experimental.....	21
	Procedimiento para la elaboración de morteros.....	21
6.2.4.	Variables respuestas	23
6.2.5.	Técnicas de Caracterización.....	24
VII.	Presentación y Discusión de resultados	28
7.1.	Resultados de Resistencia mecánica a la compresión	28
7.2.	Efecto del peso de las muestras sobre la resistencia mecánica a la compresión	31
7.3.	Resultado del ensayo de tiempo de fraguado	34
7.4.	Resultados del Ensayo del porcentaje de Absorción	36
7.5.	Resultados de Ensayo de carbonatación	37
7.6.	Resultados del Ensayo de Fluidez.	40
7.7.	Resultados del Análisis de Espectroscopia Infrarroja por medio de Transformada de Fourier para las pastas selectas	44
VIII.	Conclusiones	49
IX.	Recomendaciones	50
X.	Nomenclatura.....	51
XI.	Bibliografía.....	53
XII.	Anexos.....	56
	Anexo A Tablas	56
	Anexo B Figuras.....	61

Índice de Tablas y Figuras

Tabla 1. Composición química de puzolana volcánica	5
Tabla 2: Composición Química de la Piedra Pómez.	6
Tabla 3: Composición Química de la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar	6
Tabla 4: Características Generales del Hidróxido de Calcio	17
Tabla 5: Características Generales del Sulfato de Aluminio y Sodio	18
Tabla 6: Factores y Niveles del Diseño Experimental	19
Tabla 7: Arreglo Experimental	20
Tabla 8: Resistencia Mecánica a la compresión.....	28
Tabla 9: Peso de los morteros por cada nivel	32
Tabla 10 Datos del porcentaje de absorción de agua en morteros de las formulaciones en estudio.....	37
Figura 1: Fotomicrografía de la CBCA.....	7
Figura 2: Temperaturas aplicadas al bagazo de caña de azúcar y sus efectos ...	7
Figura 3: Distribución de Tamaño de partícula de la CBCA sin moler y molida ..	8
Figura 4: Medición del avance de Carbonatación por medio del indicador de Fenolftaleína.....	11
Figura 5: Distribución de tamaño de partícula de la Pumicita.....	13
Figura 6: a) Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar húmeda y b) Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar seca	13
Figura 7: a) CBCA antes de ser tamizada y b) CBCA tamizada.....	14
Figura 8: Distribución del tamaño de partícula de CBCA no sometida a molienda.	14
Figura 9: Tamaño de partícula de CBCA sometida a molienda.....	15
Figura 10: a) Arena saturada con agua y b) Arena lavada	16
Figura 11: Análisis Granulométrico de la arena de Motastepe	17
Figura 12: Mezcla de la formulación P.2	21
Figura 13: a) Cubos recién desmoldados b) Mortero cubierto con paño húmedo para el curado a temperatura	22
Figura 14: Proceso de curado al aire libre	22
Figura 15 Características físicas de la Pumicita.	25
Figura 16 a) Partículas de CBCA en dependencia de tamaño. b) Formas de las partículas de CBCA	25
Figura 17 Espectro IR de la Pumicita	26
Figura 18 Espectro IR de la CBCA	27
Figura 19: Efectos de RMC sobre las materias primas utilizadas.....	30
Figura 20: Comportamiento de resistencia a los 28 días respecto al peso de los morteros	32
Figura 21: Comportamiento de RMC a los 42 días con el peso unitario de los cubos.....	33
Figura 22 Tiempo de fraguado de la formulación P.15.....	34

Figura 23 Tiempo de fraguado de la formulación P.24.....	36
Figura 24 Porcentaje de Absorción de los cubos	39
Figura 25. Apariencia del mortero después de la aplicación de Fenolftaleína....	40
Figura 26 Apariencia de los cubos de la Fop después de la aplicación de Fenolftaleína.....	40
Figura 27 Comportamiento de Fluidez en las mezclas.....	41
Figura 28 Comportamiento de la Fluidez con respecto a la adición de Pumicita	42
Figura 29 Comportamiento de % de Fluidez con respecto al % de Cal.....	43
Figura 30 Espectro IR de la pasta de la Fop a la edad de 28 días	44
Figura 31 Espectro IR de la pasta de la P.15 a la edad de 28 días.....	45
Figura 32 Espectro IR de la pasta de la Fop y P.15 a la edad de 28 días	47

Índice de Anexos

Tabla A- 1 Cantidad de material utilizado en cada una de las formulaciones planteadas.....	56
Tabla A- 2 Resultados totales del ensayo de fluidez	57
Tabla A- 3 Peso de los cubos a edad de 28 días	58
Tabla A- 4 Mediciones del tiempo de fraguado de las pastas P.15 y P.24	59
Tabla A- 5 Resultados del ensayo de RMC para todas las formulaciones	60
Figura B- 1 Flujograma de obtención de compuesto	61
Figura B- 2 Maquina de los Ángeles para el desgaste de materiales	62
Figura B- 3 Mesa de Fluidez.....	62
Figura B- 4 Mezcladora para realización de mezclas	63
Figura B- 5 Aparato de Vicat para el ensayo de determinación del tiempo fraguado	63
Figura B- 6 Mufla utilizada para el proceso de curado térmico.....	64
Figura B- 7 Maquina para el ensayo de RMC.....	64
Figura B- 8 Microscopio para la caracterización física de las materias	65
Figura B- 9 Espectrómetro para el Análisis del FT-IR	65
Figura B- 10 Agitador mecánico y juego de tamices	66
Figura B-11 Metao utilizado para realización del corte transversal de los cubos	66

I. Introducción

A nivel mundial la industria productora de cemento aporta un 7% de CO₂ a la contaminación del ambiente, debido a esta problemática, muchos países desarrollados y en desarrollo se han dedicado a buscar alternativas que ayuden a minimizar estos daños. Se han empleado como materias primas desechos ya sea de origen natural o generados a partir de procesos industriales, lo que ha dado origen a líneas innovadoras de investigación en el área de cementos ecológicos.

El cemento Portland es el segundo producto más consumido después del agua, debido a que es el único material utilizado por la industria de la construcción para las edificaciones, gracias a su alto rendimiento mecánico y bajo costo, a pesar que la elaboración del mismo involucra emplear altos requerimientos energéticos y con ello una fuerte emisión de contaminantes.

En la actualidad no se ha desarrollado un material capaz de sustituir los altos rendimientos y bajos costos que ofrece el cemento gris comercial, sin embargo se han realizado estudios en los que se emplean materiales alternativos como materia prima en busca del reemplazo parcial o total del cemento portland y por lo tanto la disminución de contaminantes al ambiente.

La investigación para el desarrollo de una base cementante a partir materiales considerados desechos en Nicaragua, es una buena alternativa, como búsqueda para minimizar los requerimientos energéticos, disminuir costos y aumentar la construcción de viviendas de interés social, a la vez que se disminuye la emisión de CO₂. En la presente investigación se utilizará piedra pómez (como fuente de calcio) y ceniza de bagazo de caña de azúcar (como fuente de silicio), que son generados por empresas que se encuentran en Nicaragua como es el caso del Ingenio Monte Rosa. Dichas materias primas serán activadas por medio de Cal (como fuente de iones OH⁻) y Sulfato de Aluminio (como fuente de iones SO₄²⁻). Se espera que las mezclas presenten al menos propiedades mecánicas similares o inferiores a las del cemento portland ordinario.

II. Antecedentes

En la Universidad Nacional de Ingeniería de Nicaragua se han realizado investigaciones acerca del empleo de materiales considerados desechos como sustitutos del cemento, estos estudios se han desarrollado por parte de estudiantes de la carrera de Ingeniería Química, de los que se pueden mencionar los siguientes:

- ❖ Arias & Mercado (2015), la investigación tuvo como objetivo la sintetización de un material cementante a partir de pumita activada por medio de sulfato de calcio, a la cual posteriormente se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas y se identificaron los posibles productos de reacción, a partir de los análisis realizados se presentaron resultados de resistencia mecánica a la compresión de 12.72 MPa a 28 días, lo que equivale al 65% de la RMC del cemento portland al mismo tiempo de curado.
- ❖ Castro-Pérez (2014), elaboró pastas con Hidróxido de Calcio/Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar en proporciones de 10/90, 20/80 y 30/70 y activación química con Na_2O en forma de NaOH al 5, 10 y 15% en peso, al momento de realizar el ensayo de resistencia a la compresión se determinó que la mezcla que presento mejores resultados es la 30% CaO, 70% CBCA y 5% Oxido de Sodio con un valor de 5.48MPa, el factor que afectó la RMC fue el curado a altas temperaturas ya que disminuyó la vida útil, provocando grietas superficiales. Castro-Pérez observó como principal producto de reacción la formación de un gel de sílice.
- ❖ Zúniga (2014), evaluó las propiedades mecánicas y productos de reacción de pastas que fueron activadas alcalinamente por una mezcla de Hidróxido de Sodio (NaOH) y Silicato de Sodio ($\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3$). Aquí se varió el porcentaje de ceniza de caña y dichas pastas fueron sometidas a curado por 40°C o 60°C por 1, 3, 7, 14 y 28 días, pero la RMC fue despreciable ya que se obtuvo un valor de 1MPa como máximo. En una segunda etapa las 4 mejores formulaciones fueron investigadas para evaluar la evolución de las propiedades mecánicas y productos de reacción, las condiciones empleadas fueron distintas a las de primera etapa, es decir la temperatura de curado fue de 100° o 200°C, con lo cual se obtuvo importantes mejoras en la resistencia mecánica a la compresión de hasta 20MPa.

III. Justificación

La fabricación de cemento Portland, trae consigo la generación de contaminantes para el medio ambiente como son Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂), Monóxido de Nitrógeno (NO), Dióxido de Azufre (SO₂), además que los residuos de polvo que se forman al obtener el Clinker pueden contener metales pesados y otros contaminantes que al ser desechados en lugares determinados pueden llegar a contaminar los mantos de agua subterráneas.

Según investigaciones realizadas por (Escalante García, 2002), al producir una tonelada de cemento se emite aproximadamente una tonelada de Dióxido de Carbono, debido al tipo de combustible fósil que se emplea para la obtención del Clinker.

Debido al fuerte impacto ambiental de la industria cementera, se han realizado una serie de estudios en los que se busca la sustitución parcial o total del cemento, mediante activación alcalina o sulfática de materias primas ricas en sílice y/o calcio. La obtención de un cemento a partir de CBCA y pumicita, presenta la ventaja de fabricarse sin necesidad de utilizar altas temperaturas (1450°C), y el empleo de materias primas de bajo o nulo costo. La presente investigación tiene como objetivo obtener un cemento ecológico que será sometido a pruebas físicas y químicas para determinar su eficiencia como una base cementante en comparación al cemento Portland.

IV. Objetivos

4.1. Objetivo General

Obtener un cemento base Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar y/o Pumicita activado con Sulfato de Aluminio e Hidróxido de Calcio para el estudio de sus propiedades físicas y mecánicas.

4.2. Objetivos Específicos

1. Evaluar el efecto de los activadores químicos, Cal (CaOH_2) y Sulfato de Aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) en sus diferentes proporciones, sobre la resistencia mecánica a la compresión de los morteros con el fin de la determinación de la dosis optima de tales activadores.
2. Identificar los posibles productos de reacción de la base cementante óptima por medio de la técnica de Espectroscopia Infrarroja.
3. Determinar la resistencia mecánica a la compresión RMC aplicando ensayos de resistencia a la compresión a los morteros obtenidos en dependencia de las proporciones definidas en el diseño experimental.
4. Evaluar el efecto de la carbonatación en los morteros, para el desempeño de las propiedades físicas y químicas del cemento base CBCA-Pumicita.

V. Marco Teórico

5.1. Puzzolanas:

Son materiales silicios o silico-aluminosos que por sí solos no poseen ningún valor cementante, pero al estar en presencia de Hidróxido de Calcio (CaOH_2) y agua a temperatura ambiente tienen capacidad de reaccionar dando como resultado compuestos que poseen propiedades cementantes (Gómez González, 2009).

5.1.1. Clasificación

La manera de clasificar las puzzolanas se basa en diferentes criterios, pero el sistema comúnmente utilizado es aquel según su origen:

Puzzolanas de origen natural:

- ✓ Rocas Volcánicas donde se incluyen principalmente a las cenizas volcánicas y piedra pómez, también está la obsidiana, tufas volcánicas y andesitas.
- ✓ Rocas o tierras que contienen ópalos, entre ellas destacan la roca de sílice, diatomitas, pizarras y algunas arcillas.

De igual manera existen puzzolanas de origen artificial: que se obtiene como subproductos de procesos industriales, actualmente se encuentra un amplio campo de investigación, debido a la variedad que existen, entre las que destaca la ceniza de bagazo de caña de azúcar, escoria de alto horno, ceniza de hoja de maíz, ceniza de cascarilla de arroz y ceniza volante. (Gómez González, 2009) .

En la Tabla 1 se presenta la composición de manera general de las puzzolanas volcánicas.

Tabla 1. Composición química de puzzolana volcánica

Compuesto	Rango de Porcentaje %
SiO_2	42-73
Al_2O_3	10-20
Fe_2O_3	1-14
CaO	0-12
Na_2O	1-5
K_2O	1-5
MgO	0-11
SO_3	0-5

Fuente: (López & Molina, 2014)

5.2. Piedra Pómez

Es un material de origen volcánico, con una alta porosidad, eficaz aislante térmico y con propiedades puzzolánicas, principalmente está compuesta por SiO_2 y Al_2O_3 , pero con considerables porcentajes de CaO . Por ser considerada como una puzzolana natural puede ser empleada en la producción de cemento comercial, debido a que aumenta la durabilidad química, es decir presenta resistencia frente al ataque de aguas carbónicas,

agresivas o ligeramente ácidas. (España, 2012), en la Tabla 2 se muestra la composición química de la pómez.

Tabla 2: Composición Química de la Piedra Pómez.

Compuesto	Porcentaje %
SiO ₂	71
Al ₂ O ₃	12.8
Fe ₂ O ₃	1.75
CaO	1.36
Na ₂ O	3.23
K ₂ O	3.83
H ₂ O	3.88

Fuente: (González, Montano, & Castro, 2012)

5.2.1. Usos de Piedra Pómez.

En Nicaragua la utilización de esta materia prima en la industria de la construcción se limita al uso como agregado fino para la producción de materiales ligeros y de alta resistencia térmica. Otro de los usos es el de filtro natural debido a su alta porosidad.

Además es utilizado en agricultura y horticultura gracias a los beneficios que proporciona para el drenaje y filtración de agua, pH natural, y conductor de riesgo, de igual manera puede ser empleado en el área de cosméticos como base en productos de limpieza facial y corporal, ya que sirve como exfoliante de impurezas.

Por lo antes descrito se puede concluir que a pesar de las propiedades puzolánicas que posee la pumicita (pómez pulverizada), la industria la ocupa para otros fines, y los usos en construcción son limitados.

5.3. Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar

Esta ceniza se origina por la calcinación del bagazo de caña de azúcar, las características de la ceniza van en dependencia de tipo de caña, edad, suelo de cultivo y cantidad de fertilizante utilizado. En la Tabla 3 se presenta la composición química de la CBCA del Ingenio Monte Rosa:

Tabla 3: Composición Química de la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar

Compuesto	Porcentaje %
SiO ₂	62.33
FeO ₂ + Al ₂ O ₃	11.65
CaO+ MgO	5.14
Na ₂ O y K ₂ O	4.66
-	2.09
PPI	14.13

Fuente: (Zúniga, 2014)

En Nicaragua la CBCA tiene la característica de estar formada químicamente por Óxido de Sílice y Óxido de Aluminio y según estudios realizados en CINVESTAV México por

egresadas de la FIQ ((Castro, 2014) y (Zúniga, 2014)), una vez molida la ceniza posee una morfología de partículas irregulares en forma de bastones y una estructura porosa, dichas morfología se observan por medio de una fotomicrografía de la CBCA, como se muestra en la Figura 1.

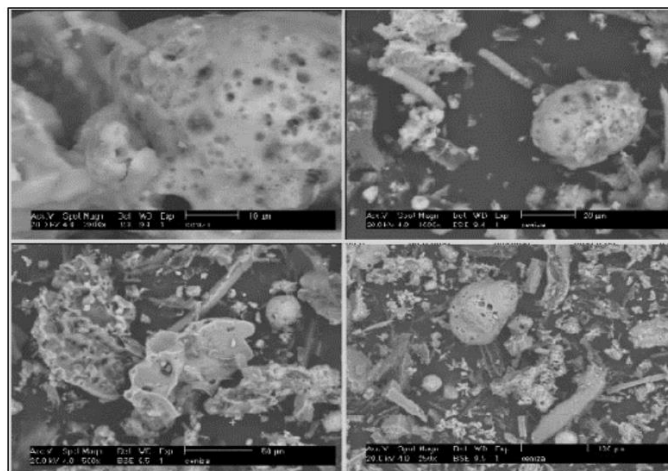


Figura 1: Fotomicrografía de la CBCA

Fuente: (Castro, 2014)

Sin embargo se debe de tener en cuenta las condiciones a las que se quema el bagazo, ya que se pueden presentar diversas modificaciones en la estructura cristalina en dependencia de la temperatura utilizada para obtención de la ceniza, lo cual se detalla en la Figura 2.

	A 100°C se presenta una pérdida inicial de masa, resultante de la evaporación de agua absorbida.
	A 350°C Inicia una ignición del material más volátil, aquí es donde inicia la quema del bagazo.
	Entre 400° a 500°C el carbón residual y los óxidos se forman, se observa una pérdida más importante de masa, después de esta etapa la ceniza se convierte en amorfa, rica en sílice.
	El uso de temperaturas por arriba de los 700°C puede llevar a la formación de cuarzos, y niveles aún más elevados de temperatura, pueden crear otras formas cristalinas.
	Encima de los 800°C, el sílice presente en la ceniza del bagazo de caña de azúcar es esencialmente cristalino.

Figura 2: Temperaturas aplicadas al bagazo de caña de azúcar y sus efectos

Fuente: (Castro, 2014)

Por lo anterior, conviene someter al bagazo a una temperatura que oscile entre 400° a 500° C, debido a que la ceniza obtenida es rica en sílice, sin embargo la temperatura de

quemado es un parámetro que depende fundamentalmente de las condiciones de operación del ingenio azucarero.

De acuerdo con (Zúniga, 2014) la CBCA tiene un tamaño promedio de partícula de 88.66 μm sin ser sometida a molienda en comparación a 12.71 μm cuando es molida, por lo tanto disminuye su tamaño y aumenta su área superficial, al igual que su reactividad ante agentes activantes.

En la Figura 3 se observa la distribución de tamaño de las partículas de ceniza del Ingenio Monte Rosa:

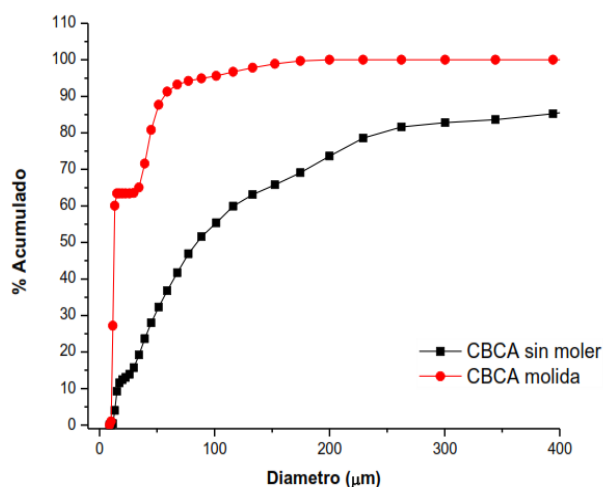


Figura 3: Distribución de Tamaño de partícula de la CBCA sin moler y molida

Fuente: (Zúniga, 2014)

5.3.1. Usos de la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar

Dado su alto contenido de sílice, posee propiedades que pueden ser utilizadas para la sustitución parcial de los componentes que forman el cemento portland, además puede ser utilizada en la elaboración de bloques de suelo compacto, debido a que mejora las propiedades de resistencia y durabilidad de los bloques (Anónimo, 2014).

Otras de las funciones en la construcción, es la implementación de ceniza en la fabricación de hormigones sustituyendo al agregado fino en porcentajes que oscilan entre un 30% y un 50%.

5.4. Cemento compuesto

Término aplicado a todos aquellos cementos que se elaboran a partir de combinaciones binarias o ternarias de desechos de tipo natural y/o industrial, inclusive cemento portland.

5.5. Mortero

Es una mezcla plástica obtenida con la mezcla de un aglomerante, arena y agua, que sirve para unir las piedras y ladrillos que integran las obras físicas. (Carmona Durán, 2011)

5.6. Pasta

Es una mezcla de agua más un aglomerante, y su consistencia es normal.

5.7. Tiempo de fraguado

Es el tiempo que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla, es decir que durante este proceso la mezcla pierde plasticidad, y por ende se vuelve difícil de manejar. Existen dos tiempos de fraguado el inicial que para el cemento comercial oscila entre 45 a 60 minutos, y el tiempo final de fraguado que se estima en 10 horas.

5.8. Curado

Es el término que se utiliza para promover la hidratación del cemento.

El curado tiene el objetivo de evitar el secado prematuro del mortero o pasta, y por lo tanto impide que se produzca una contracción precoz, y por ende la formación de fisuras.

La falta o la insuficiencia de curado de manera adecuada, daña la durabilidad de la pasta o mortero, y en particular las características superficiales.

5.8.1. Temperaturas de curado.

Según estudios realizados la temperatura a aplicarse a cementos que se elaboran con residuos debe de oscilar entre 20 y 90°C.

5.9. Activación alcalina

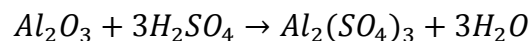
Es definida como un proceso químico en el cual el polvo de aluminosilicato es mezclado con un activador alcalino para la producción de una pasta capaz de fraguar y endurecer en un periodo corto de tiempo.

5.9.1. Tipos de activadores

Sulfato de Aluminio

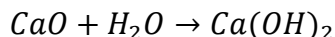
Es una sal sólida de color blanco, que se utiliza en la industria generalmente como floculante en la purificación de agua potable y en la industria de papel.

Se obtiene al reaccionar un mineral aluminico con ácido sulfúrico a elevadas temperaturas.



Hidróxido de Calcio.

Este reactivo se obtiene al hacer reaccionar agua con óxido de calcio, en el que se produce un apagado exotérmico, es decir que se desprende gran cantidad de calor que evapora parte del agua utilizada. (CALINDRA, 2011)



5.10. Resistencia mecánica a la compresión

Es la capacidad que poseen los materiales de construcción para soportar una carga por unidad de área, generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2), y se reporta al tiempo de curado de cada una de las pastas o morteros que se elaboran. (González, Montano, & Castro, 2012).

5.11. Absorción de agua

Es considerado como el incremento en la masa del material ocasionado por la penetración de agua entre los poros durante un lapso de tiempo, este término se expresa como porcentaje de masa seca por medio de la siguiente ecuación:

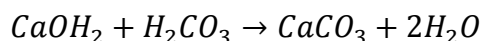
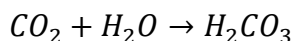
$$\% \text{ absorción} = \frac{P_{sat} - P_{sec}}{P_{sec}} * 100$$

5.12. Carbonatación

Es considerada la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono reacciona con la humedad dentro de los poros del mortero, y trae como consecuencia la conversión del hidróxido de calcio a carbonato de calcio que tiene un pH más neutral. (Montani, 2000)

El descenso de la alcalinidad se produce por reacción en los componentes de carácter básico con los componentes ácidos, lo que trae consigo efectos como corrosión del refuerzo, aumentos en las resistencias a la tracción y compresión de las zonas afectadas, de igual manera a tensiones y micro-fisuración. (Galán García, 2011)

Dicha carbonación de cementos se puede apreciar por medio de las ecuaciones siguientes:



5.12.1. Técnica de indicador de pH

Esta técnica es empleada para la identificación del efecto de carbonatación en los concretos, la cual consiste en la aplicación de una disolución de fenolftaleína al 1% con el fin de la identificación de la carbonatación a partir de la coloración de las muestras a la que es aplicada.

Esta técnica permite diferenciar tres zonas de pH, inferiores a 8, donde la superficie se torna de una tonalidad incolora, esto indica que existe presencia de carbonatación, si el rango de pH oscila entre 8 y 9.5 la tonalidad apreciada es de un rosa suave, si el color

observado es rojo purpura intenso, es decir que el pH es mayor a 9.5 el concreto no presenta carbonatación alguna. (Galán García, 2011). En la Figura 4 se aprecia el efecto que realiza la fenolftaleína en un concreto.



Figura 4: Medición del avance de Carbonatación por medio del indicador de Fenolftaleína

Fuente: (Vidaud & Vidaud, 2013)

5.13. Productos de reacción

Hay muy poca información sobre este tipo de compuesto sílice-cal-sulfatos, por lo que los productos de reacción que se pueden originar a partir de esta mezcla se tratarán de identificar por la técnica FT-IR.

5.14. Técnica para la identificación de productos de reacción

5.14.1. Espectroscopia Infrarroja

Es una técnica que se emplea para la identificación de grupos funcionales en química orgánica, sin embargo en la actualidad se utiliza para la identificación de compuestos inorgánicos originados por reacciones de geo polimerización.

Esta técnica presenta grandes ventajas, debido a su versatilidad, ya que permite estudiar cualquier muestra con total independencia del estado en que se encuentre.

Además desde 1940 se cuenta con espectrofotómetros y luego la inserción del método de transformada de Fourier, lo que ha mejorado la calidad de espectros y tiempo de obtención de datos. (Serrano Martínez)

VI. Metodología

6.1. Materiales:

En el presente acápite se detallan los procedimientos realizados a las materias primas con el fin de adecuarlas para la obtención del cemento base.

6.1.1. Pumicita

La Piedra Pómez fue adquirida en la Ferretería Lugo en una presentación de piedra decorativa para jardín que distribuye la empresa Hidra Poma, este tipo de piedra tiene una granulometría variada que oscila entre los 10 a 50 mm de diámetro, debido a esto fue sometida a pulverización por medio de una máquina de desgaste de materiales de marca Soiltest modelo 890X748, que cumple con la función de un molino de bolas.

La pulverización se realizó con el propósito de generar que el tamaño de partícula de la pumicita fuera el óptimo para realizar la base cementante, y a su vez facilitar las reacciones que se originen al mezclar las materias primas y activadores en la obtención del aglomerante.

La pulverización se efectuó en el molino por un periodo de 90 minutos, divididos en 6 ciclos cada uno de 15 minutos, con una carga de bolas total de 8 kg por cada 2.5 kg de materia, es decir que se empleó una relación de 3:1. La masa total de piedra pómez que se procesó fue de 13kg.

La reducción de tamaño de la piedra pómez se realizó en las instalaciones del laboratorio de suelos y materiales de la FTC del RUPAP de la UNI.

Una vez finalizado el proceso de pulverización, la pómez pulverizada fue trasladada a las instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias perteneciente a la FIQ ubicado en el RUSB con el fin de realizar el tamizado de la materia y así determinar el tamaño de partícula deseado que se utilizaría en el trabajo investigativo.

Para el tamizado de la pómez pulverizada se utilizó en un juego de tamices regidos por la norma ASTM y un agitador automático modelo RX-29 para los mismos. Para lo cual se realizaron corridas de 500 gramos por un lapso de tiempo de 15 minutos.

Por medio de la utilización del juego de tamices se buscó que el material a emplearse en las mezclas tuviera una finura menor a 0.063mm, para ello se empleó el tamiz malla 230 por medio del cual se obtuvo un diámetro de partícula de 50.78 μm , luego las partículas que fueran mayor a la abertura de esta malla, fueron reprocesadas con el fin de no tener demasiadas pérdidas de material y así poder utilizarse al máximo.

En la Figura 5 se presenta que la cantidad que quedó retenida en malla 230 equivale a un 34% del total de materia utilizada en el ensayo de tamizado.

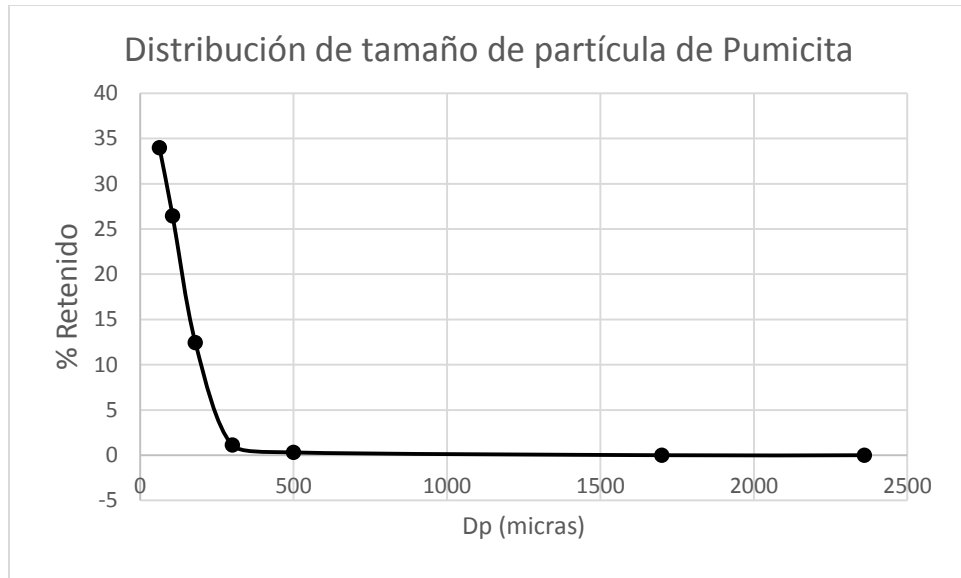


Figura 5: Distribución de tamaño de partícula de la Pumicita.

Es importante mencionar que se consideró como materia fina a lo retenido en las mallas 140 y 230, dado dicha consideración la materia fina es de 60.44% de la materia total utilizada.

6.1.2. Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA)

La CBCA fue donada por el Ingenio Monte Rosa, esta ceniza se sometió a remoción de humedad dividido en lotes, por medio de un horno de convección marca Barnstead Thermolyne modelo OV47450, para lo cual se colocaron muestras de ceniza en cápsulas de porcelana aplicándoles una temperatura de 110°C por un lapso de 24 horas, posteriormente se procedió a determinar el porcentaje de humedad que contenía la CBCA al momento de ser adquirida por medio de la siguiente ecuación.

$$\%H = \frac{M_{Total} - M_{seca}}{M_{Total}}$$

Por medio del primer lote de CBCA que se sometió al proceso de secado se obtuvo que el %H es igual a 34.82%. En la Figura 6 se muestra la CBCA antes y después de ser sometida a secado.

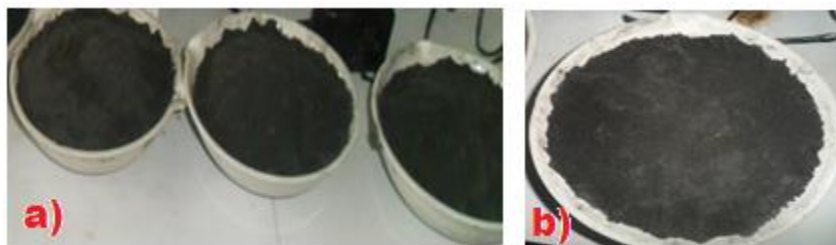


Figura 6: a) Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar húmeda y b) Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar seca

Una vez seca la ceniza de bagazo de caña de azúcar se procede al tamizado por medio de un juego de tamices con el número de mallas 12, 20, 35, 50, 80, 140, 230; con el propósito de separar impurezas que pueda contener la muestra, además de la determinación del tamaño de partícula deseado para la elaboración del compuesto, por medio del análisis granulométrico. En la Figura 7 se muestra la ceniza antes de ser sometida a tamizado y luego de haber pasado por el juego de tamices.



Figura 7: a) CBCA antes de ser tamizada y b) CBCA tamizada

Por análisis granulométrico se obtuvo un diámetro de partícula promedio de $47.01\ \mu\text{m}$ para la CBCA que no fue sometida a molienda. La cantidad de ceniza que quedó atrapada en la malla 230 representa un 24.76% de total sometido a la operación de tamizado y se ve reflejado en la Figura 8.

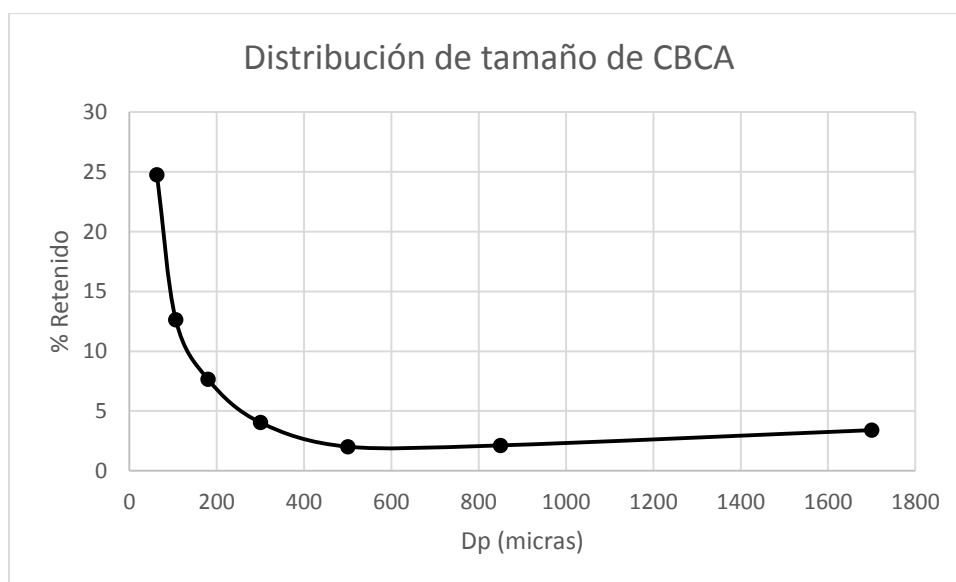


Figura 8: Distribución del tamaño de partícula de CBCA no sometida a molienda.

En los primeros dos tamices se retuvo impurezas como fueron piedras de distintos tamaños y bagazo de caña, los cuales fueron desechados, posteriormente la materia que quedó retenida en las mallas de los tamices número 35, 50 y 80 se trasladó al Laboratorio de Suelos y Materiales para ser sometida a molienda, dicha pulverización se realizó por

un lapso de tiempo de 90 minutos dividido en 6 ciclos de 15 minutos y 500 revoluciones por cada ciclo.

Luego se efectuó de nuevo el análisis granulométrico en las instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias, determinando así el diámetro del partícula para CBCA pulverizada de $56.35\ \mu\text{m}$.

En la figura 9 se puede apreciar la distribución granulométrica de la ceniza de bagazo de caña de azúcar después de haber sido sometida a pulverización.

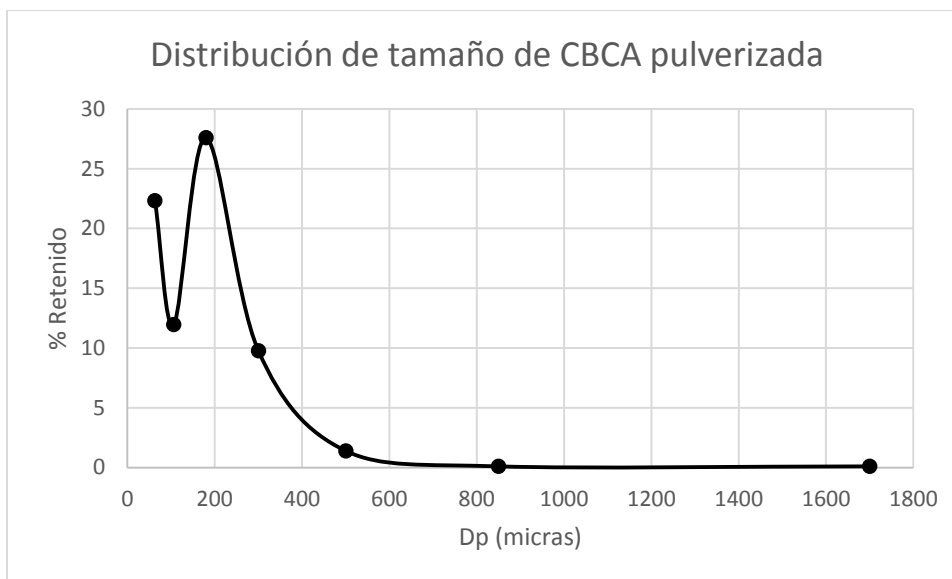


Figura 9: Tamaño de partícula de CBCA sometida a molienda

Si se realiza una comparación con respecto a la CBCA molida y sin ser sometida a pulverización se puede concluir que no es necesario la pulverización debido a que el tamaño de partícula es la adecuada para la obtención del compósito.

La molienda fue empleada con el propósito de conocer si se obtenía un mejor desempeño por parte de la CBCA, no obstante la cantidad de material que paso los tamices 140 ($106\mu\text{m}$) y 230 ($63\mu\text{m}$) fue menor en comparación a la no sometida a molienda esto fenómeno puede ser atribuido a que se utilizó una máquina de desgastes de materiales que a pesar de tener características similares a un molino de bolas, se observaba que la ceniza quedaba con una granulometría bastante heterogénea.

Sin embargo la ceniza sometida al proceso de desgastes se utilizó con el objetivo de maximar la materia con la que se contaba, tomando solamente la CBCA que pasaba por el tamiz mallas 140 y 230.

6.1.3. Agua de mezclado

El agua utilizada para la elaboración de las pastas y morteros es agua potable del laboratorio de Suelos y Materiales, ya que según las normas se puede emplear este tipo de agua y no afecta las condiciones del producto obtenido.

6.1.4. Agregado fino

Para la fabricación de los morteros es necesario el empleo de un material que contribuya a mejorar la resistencia de los especímenes, sin embargo este debe de ser inerte, es decir no puede inferir en las propiedades químicas del compósito.

La arena utilizada para elaboración de las probetas cubicas proveniente del Cerro Motastepe, debido a que el agregado fino debe de cumplir con una granulometría específica en la norma, se procedió a realizar el ensayo sobre la distribución granulométrica según lo descrito en la norma (ASTM-C-136, 2006).

Por lo que una vez adquirida la arena se trasladó a las instalaciones del laboratorio de Materiales y Suelo de la FTC, donde se tamizo por la malla N°4.

Posteriormente se pesó una muestra de 500g la cual se dejó por un lapso de 24 horas saturando en agua.

Transcurrido el día de saturación se procedió a lavar la muestra a través de la malla N°200 con el propósito de eliminar las partículas menores a $75\mu\text{m}$, en seguida se secó exponiéndola a 110°C durante 24 horas en un horno modelo Blue M C-4850-Q, una vez finalizado el proceso de secado se procedió a tamizar la muestra por cada una de las mallas que describe la norma.

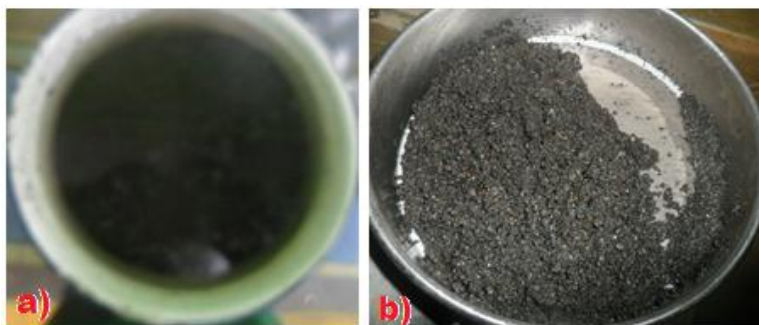


Figura 10: a) Arena saturada con agua y b) Arena lavada

En la figura 10.a se puede apreciar como la arena fue saturada y en la figura 10.b se observa la arena después de ser lavada para la remoción de partículas que son consideradas como finas.

Según la curva granulométrica que se observa en la Figura 11, nos muestra que la arena adquirida se encuentra en los límites establecidos en la norma (ASTM-C-136, 2006) y por lo tanto puede ser utilizada para la elaboración de los especímenes.

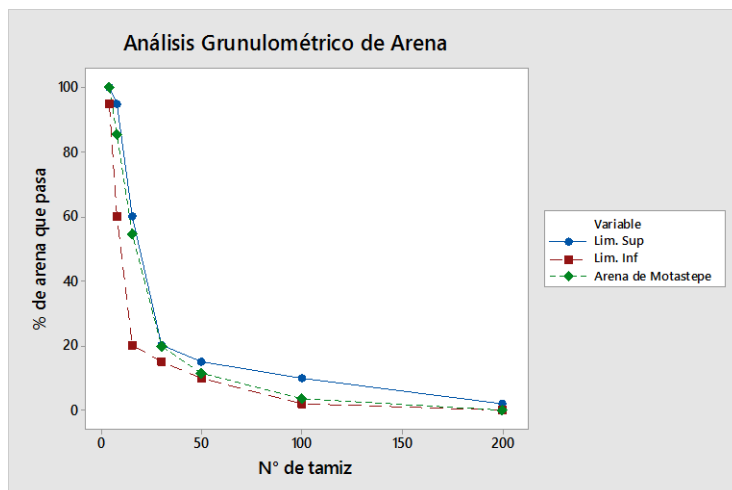


Figura 11: Análisis Granulométrico de la arena de Motastepe

Este análisis granulométrico permite realizar el cálculo del módulo de finura el cual se determina a partir de la siguiente ecuación.

$$MF = \frac{\sum \% \text{ retenidos acumulados en cada tamiz}}{100}$$

$$MF = \frac{14.76 + 45.63 + 72.53 + 88.68 + 96.48}{100} = \frac{318.08}{100} = 3.18$$

El valor del módulo de finura que se obtuvo indica que la arena utilizada para la elaboración de las mezclas es considerada una arena ligeramente gruesa pero sin embargo se encuentra entre los límites que oscilan entre 2.90 y 3.20 según (Rivera, 2016)

6.1.5. Cal Hidratada

La Cal Apagada utilizada en el trabajo investigativo fue adquirida en la Empresa Bloque Roca, que comercializa cal proveniente del Grupo Calidra, este material es utilizado como fuente de ion OH^- con el objetivo de mejorar la trabajabilidad, resistencia y estabilidad de igual manera contribuye una consistencia normal a la pasta de cemento.

Para la investigación es necesario tener presente algunas características de la cal apagada y así sustentar el empleo de esta en la sintetización del cemento base, las cuales se indican en la Tabla 4.

Tabla 4: Características Generales del Hidróxido de Calcio

Composición Química	
Componente	Concentración (% en peso)
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	82.00
Al_2O_3	0.40
Fe_2O_3	0.15
MgO	1.00

SO ₃	1.00
SiO ₂	1.20
Propiedades Físicas	
Distribución Granulométrica	90% pasa por la malla # 200
Densidad a granel (compactada)	600 Kg/m ³
Gravedad Especifica	2.3-2.4

6.1.6. Sulfato de Aluminio y Sodio

Fue adquirido en la Distribuidora del Caribe, utilizado en la industria alimenticia como agente leudante, conservador y amortiguador de pH, se utilizó como sustituto del sulfato de aluminio que no se pudo adquirir debido al alto costo que tiene en el mercado, por lo que se empleó como activador alcalino ya que aportó el ion SO⁻²₄ a la mezcla, además de ayudar a mantener un medio básico.

En el estudio es importante conocer las propiedades físicas y química de este activador, con el objetivo de justificar su empleo en la elaboración del compósito, las que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Características Generales del Sulfato de Aluminio y Sodio

Composición Química	
Componente	Composición (% en peso)
NaAl(SO ₄) ₂	99.00
Inerte	1.00
Características Físicas	
Solubilidad	Soluble en agua
Densidad	1.7 kg/m ³
Color	Blanco
Estado	Polvo

6.2. Método.

6.2.1. Variables de Estudio

Se elaboraron pastas y morteros base Pumicita/CBCA variando sus porcentajes en peso, de igual manera se agregaron los activadores en distintas proporciones, con el fin de evaluar el desempeño de la resistencia mecánica a la compresión (RMC) tomando como base la Tabla 6 e identificar los productos de reacción que se originen a través de la técnica espectroscopia Infrarroja.

Tabla 6: Factores y Niveles del Diseño Experimental

Niveles	Factores			
	% Pumicita/CBCA	% CaOH ₂	% AlNa(SO ₄) ₂	Temp. (°C)
1	0/100	10	0	50
2	25/75	20	3	50
3	50/50	30	4	50
4	75/25	35	5	50
5	100/0	40	6	50

Donde:

%CBCA: Porcentaje en peso de Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar.

% CaOH₂: Porcentaje en peso de Cal el cual es uno de los activadores, dicho peso es sobre el peso total de la pasta cementante Pumicita/CBCA.

% AlNa(SO₄)₂: Porcentaje en peso de Sulfato de Aluminio y Sodio considerado un activador, con respecto al peso total de pasta cementante Pumicita/CBCA.

Temp. (°C): Temperatura de Curado a la que será sometida la pasta, siempre constante e igual a 50°C.

6.2.2. Arreglo Experimental

Se realizó a partir de la metodología de Taguchi, con el propósito de determinar el número de veces que se debe de realizar el experimento. Además este método ayuda a la optimización por medio de la identificación de los factores que afecten en cuanto a la magnitud y variabilidad en las variables respuestas, y por lo tanto se minimizara la función de pérdida.

A partir del diseño experimental de Taguchi se elaboraron 25 morteros. Para el análisis estadístico se utilizó el software Minitab 17.

En la Tabla 7 se presenta el arreglo experimental para la preparación de los morteros correspondientes:

Tabla 7: Arreglo Experimental

Formulación	% Pumicita/ CBCA	% CaOH ₂	% Al ₂ (SO ₄) ₃	Temp. (°C)
P.1	0/100	10	0	50
P.2	0/100	20	3	50
P.3	0/100	30	4	50
P.4	0/100	35	5	50
P.5	0/100	40	6	50
P.6	25/75	10	0	50
P.7	25/75	20	3	50
P.8	25/75	30	4	50
P.9	25/75	35	5	50
P.10	25/75	40	6	50
P.11	50/50	10	0	50
P.12	50/50	20	3	50
P.13	50/50	30	4	50
P.14	50/50	35	5	50
P.15	50/50	40	6	50
P.16	75/25	10	0	50
P.17	75/25	20	3	50
P.18	75/25	30	4	50
P.19	75/25	35	5	50
P.20	75/25	40	6	50
P.21	100/0	10	0	50
P.22	100/0	20	3	50
P.23	100/0	30	4	50
P.24	100/0	35	5	50
P.25	100/0	40	6	50

Lo que indica la Tabla 7, es como se distribuye la elaboración de los morteros en dependencia del número de factores involucrados en el proceso, por lo que se puede apreciar que la relación Pumicita/CBCA cambia en un intervalo de 5 formulaciones, sin embargo la cantidad de Ca(OH)_2 y activador cambian con respecto a cada formulación.

6.2.3. Desarrollo Experimental

Procedimiento para la elaboración de morteros.

Una vez acondicionada la materia prima, se procedió a su mezclado en dependencia de las formulaciones previamente determinadas, dicho procedimiento se realizó en una batidora a velocidad baja para evitar que se desprenda polvo.

En seguida se procedió a la adición del activador, el cual fue mezclado con las materias primas con el fin de alterar las propiedades de las mismas y así agilizar el proceso de reacciones que den origen a las propiedades cementantes, este paso se realizó por un lapso de tiempo de 90 segundos.¹

Nuevamente se inició el proceso de mezclado adicionando el agregado fino, el cual debe de ser previamente saturando con un 9% de agua, procedimiento que se realizó a velocidad baja por un periodo de tiempo aproximado de 40 segundos, debido a que la arena contiene agua se detuvo el mezclado, para remover partículas de arena que se encuentren en las paredes del recipiente dejando reposar por un periodo de tiempo de 90 segundos, posteriormente, se reanuda el mezclado y además se adiciona el agua de en los primeros 30 segundos, seguidamente se cambió a velocidad intermedia con el objetivo de ayudar a la homogenización de la mezcla proceso que duro 120 segundos.

En la Figura 12 se ve la mezcla de la formulación P.2.



Figura 12: Mezcla de la formulación P.2

La siguiente etapa es el llenado de los moldes, los cuales fueron previamente engrasados para facilitar el desmolde un vez fraguado el mortero.

Para la fabricación de las probetas cubicas se utilizó una relación de a/l de 0.8, una masa de compuesto de 330 gramos la cual se basó en la Tabla 7 y una cantidad de agregado fino (arena) de 990 gramos en base a la relación de 3:1 en peso.

¹ Ver Flujograma de obtención de compuesto en Anexo B

Para la aplicación de los golpes se realizaron dos rondas de 16 golpes por cada capa de mezcla deposita en el molde en una secuencia ortogonal por medio un pisón tamper.

Una vez finalizado el llenado, compactación y enrasado de los moldes estos se tapan para el proceso de curado y así evitar el contacto con el agua.

Posteriormente los cubos se dejan curar a temperatura ambiente y al aire libre como se puede observar en la Figura 14, hasta el periodo de 28 y 42 días en los cuales se aplicó el ensayo de resistencia mecánica a la compresión.



Br. César Enrique Rivera Meza.

6.2.4. Variables respuestas

6.2.4.1. Ensayo de Resistencia Mecánica a la Compresión (RMC).

Una vez terminado el periodo de curado de los morteros a las edades determinada como son de 28 y 42 días se procedió a realizar por triplicado las pruebas de resistencia a la compresión por medio de la máquina ELE Internacional modelo 36-0650/02, dicho ensayo determinara los posibles usos que les puede dar al cemento en la industria de la construcción.

6.2.4.2. Determinación del tiempo de fraguado

En el estudio realizado por (López & Molina, 2014), el tiempo de fraguado lo determinaron por medio de aparato Vicat, el cual consistió en la acción de hacer descender una aguja con un diámetro de 1mm la cual entro en contacto con la pasta, este procedimiento se realizó por un lapso de 30 segundos, repitiéndose cada 15 minutos, hasta que la aguja de Vicat no penetro en la pasta.

6.2.4.3. Ensayo de % de absorción de agua

El ensayo a utilizar se basó en la norma ASTM C 128, la cual describe lo siguiente:

Una vez finalizados los ensayos de RMC se tomaron muestras de morteros para ser sumergidas en una cubeta con agua con una temperatura aproximada de 25°C durante un periodo de 24 horas para lograr saturación.

Posteriormente se someten a escurrido, luego se registró su peso saturado continuando con el proceso los morteros se secaron por medio de un horno de convección mecánica Barnstead Thermolyne modelo OV47450 durante 24 horas a una temperatura de 105°C y seguidamente registro su peso seco (ASTM-C128)

6.2.4.4. Ensayo de Resistencia a la Carbonatación

Para la determinación del grado de avance de carbonatación se aplicó el método de indicador de pH por medio de disolución de fenolftaleína al 1%, dicha solución se preparó con alcohol isopropílico.

Para realizar el ensayo, los morteros fueron sumergidos en una solución de carbonato de sodio 5% por un lapso de 1 y 5 días.

Posteriormente se procedió al escurrido de los mismos, con el propósito de eliminar el exceso de la solución a que fueron expuestos.

Una vez removida el exceso de solución de carbonato de sodio a los morteros se les aplicó inmediatamente la solución de fenolftaleína en su superficie externa, con el objeto de identificar el grado de carbonatación en las muestras.

Para una segunda etapa se realizó un corte transversal al cubo y se les retiró el polvo que quede albergado en la superficie, seguidamente aplicándole la fenolftaleína.

Finalmente se midió la profundidad de carbonatación en los morteros.

(Vidaud & Vidaud, 2013)

6.2.4.5. Ensayo de Fluidéz

Este ensayo se realizó basándose en la norma (ASTM-C-1437, 2007) que determina el flujo en morteros de cemento hidráulico, ya que los cementos verdes carecen de normas para la determinación de la fluidez.

En la que se utilizó una mesa de fluidez que está formada por un soporte, por un árbol y una plataforma circular, está elaborada de bronce la cual no debe reaccionar con el material que se deposita en ella para no inferir en los resultados a obtener.

El ensayo consistió en llenar un molde cónico en dos capas a las cuales se les aplico 20 golpes a cada una, con el propósito de compactar la mezcla luego el molde se retiró, y posteriormente se procede a aplicar 25 golpes a partir de hacer girar la manecilla que está en el soporte este procedimiento debe durar 15 segundos.

6.2.5. Técnicas de Caracterización

En este apartado se describirá cada uno de los procedimientos que se realizaron para conocer como estaban formadas las materias primas principales como es el caso de CBCA y P por medio de la utilización de dos instrumentos que se mencionan a continuación.

Caracterización microscópica de las materias en estudio.

Para dicho análisis se hizo uso del microscopio marca L.W Scientific modelo Anti-mould 002759 equipo que se encuentra en las instalaciones del laboratorio de Alimentos de la FIQ.

Pumicita.

En la observación realizada a través del microscopio se pudo apreciar que la forma de la P es de pequeños cristales de forma circular u ovalados pero en algunos casos de forma no definida lo que indica que la estructura es amorfa, de color gris a blanco con la excepción de algunas partículas de color metálico ya que en su composición se encuentra el ion Al o color trasparente, además se notó formas de bastones cilíndricos al momento de que los cristales se agrupaban, también hay mencionar que no tienen un tamaño definido debido a la pulverización realizada.

En las Figura 15 se puede apreciar la forma color y tamaño de la Pumicita.

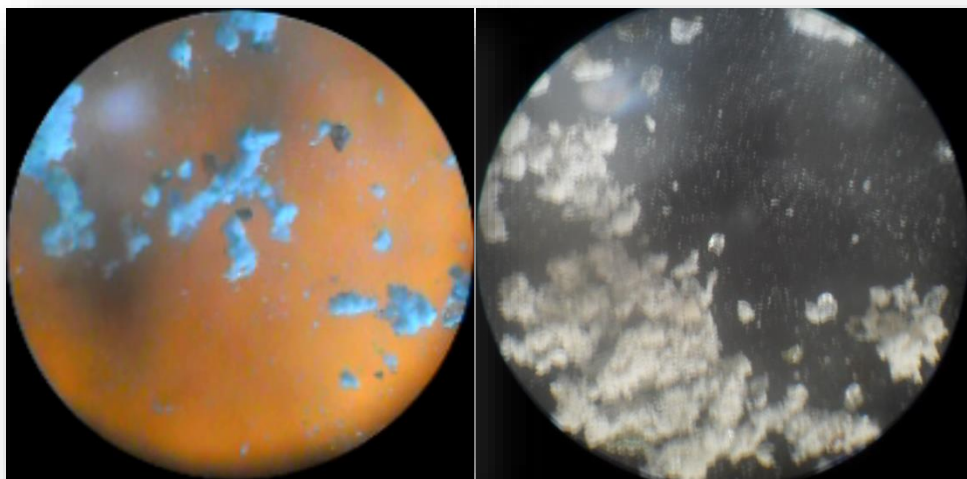


Figura 15 Características físicas de la Pumicita.

Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar

A partir de la Figura 16 se puede apreciar que la CBCA no tiene una forma definida, esta va en dependencia de la agrupación de sus partículas, también se observó que el tamaño de las partículas es variable lo cual se ve reflejado en el análisis granulométrico (sección 6.1.2) de esta, con respecto a la formas observadas se pueden definir como bastones alargados, y pequeñas circunferencias de forma heterogénea y tamaño variable.

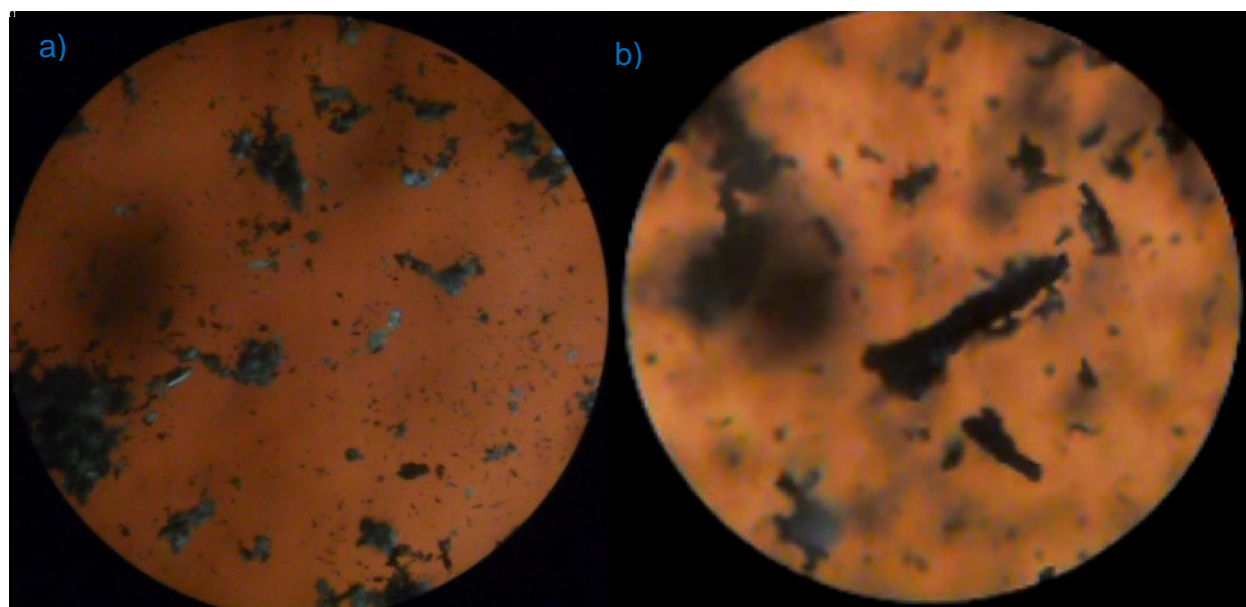


Figura 16 a) Partículas de CBCA en dependencia de tamaño. b) Formas de las partículas de CBCA

Caracterización por Espectroscopia Infrarroja por transformada de Fourier FT-IR

Este análisis se realizó por medio de un espectroscopio marca Bruker modelo Alfa 03271/03, en modo de transmitancia con un rango de número de onda comprendido desde 400 hasta los 4000 cm^{-1} . Para la realización del análisis se debió preparar una mezcla de una sal de alta pureza en este caso KBr, y la muestra con una proporción de 90% del reactivo y 10% del analito, con el propósito de preparar una pastilla. El espectro se obtuvo por medio del software OPUS 6.5.

Es importante aclarar que la técnica es cualitativa y que ya se encuentran asignados un rango de número de onda a los grupos funcionales que se pueden encontrar en la materia en estudio.

Espectroscopia infrarroja de la P

En la Figura 17 se muestra el espectro IR de la P, en el que se observa bandas de vibraciones de los grupos característicos de la pumicita, observamos que en la banda de los 3751 cm^{-1} la cual se puede atribuir a la presencia de agua en forma de enlace O-H en la materia a pesar que esta se encontraba en estado seco, también se puede apreciar la presencia del enlace de Si-O en las bandas 1638 cm^{-1} y 459 cm^{-1} , la sílice amorfa se encuentra en la banda de los 781 cm^{-1} .

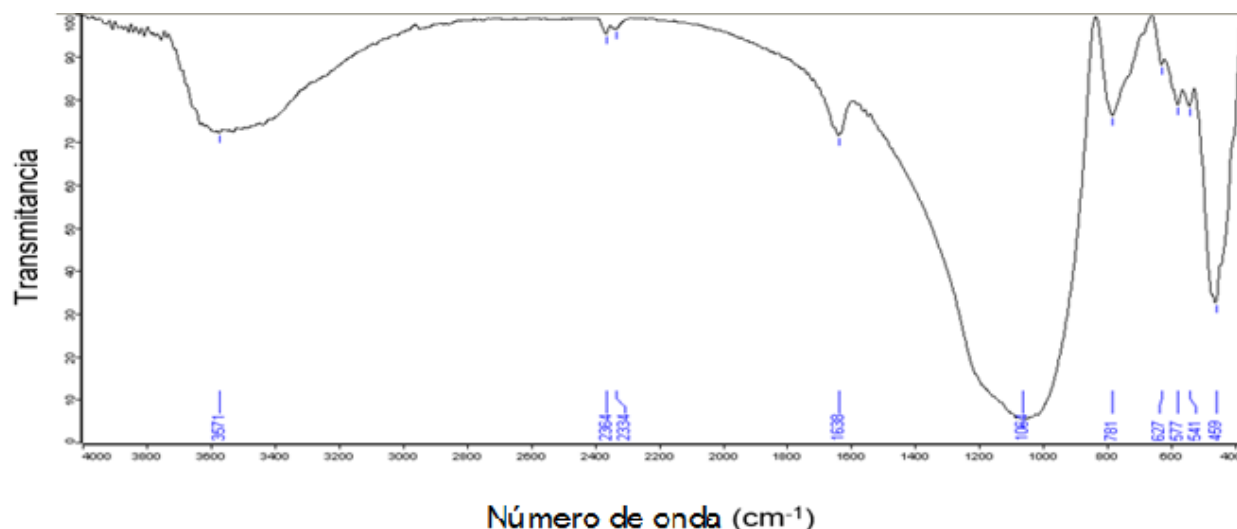


Figura 17 Espectro IR de la Pumicita

Espectroscopia Infrarroja de la CBCA

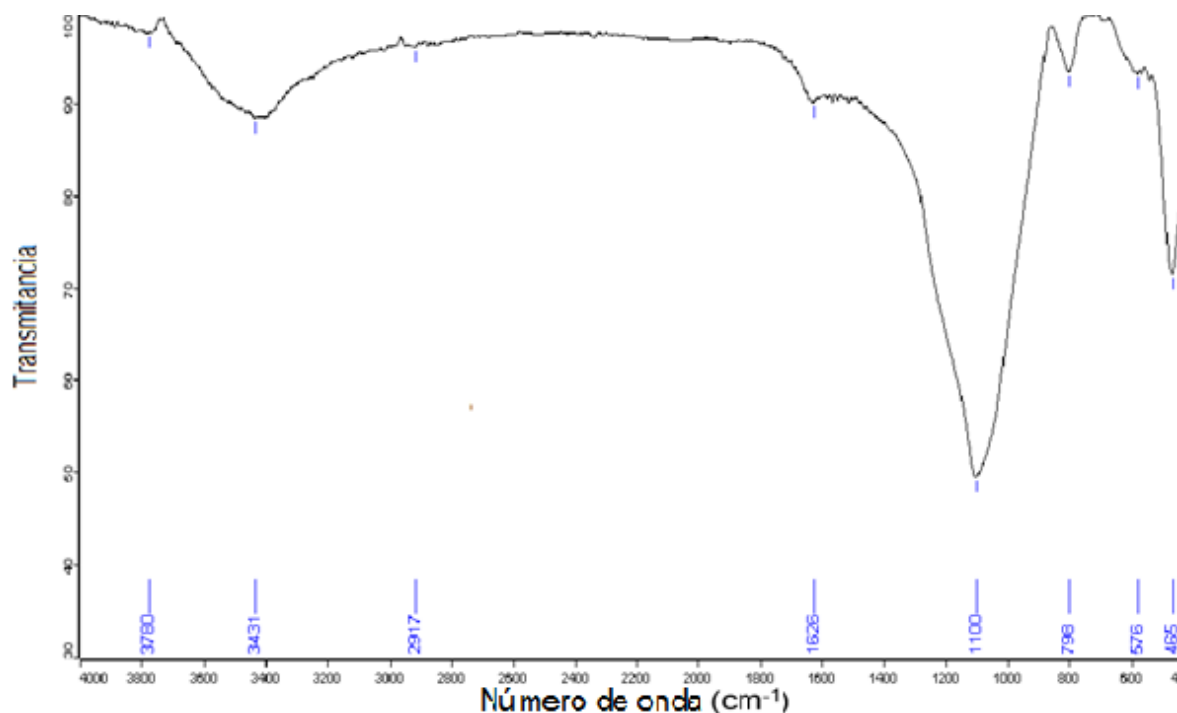


Figura 18 Espectro IR de la CBCA

En la figura 18 se aprecia el espectro IR característico de la CBCA donde se muestran las distintas bandas de vibraciones de los compuesto que esta posee, la banda que se extiende desde 3781 cm^{-1} a 3431 cm^{-1} es característica del enlace O-H lo que se asume como agua, para el enlace de Si-O se encuentra una banda de número de onda de 1626 cm^{-1} de igual forma se presenta en la banda de 465 cm^{-1} , también se puede asumir que se encuentra el TiO_2 dado a pequeñas vibraciones que se observan entre 1626 cm^{-1} y 1200 cm^{-1} en las bandas que comprende entre los 1000 cm^{-1} y 800 cm^{-1} corresponde a enlaces Si-O.

VII. Presentación y Discusión de resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos de RMC, posteriormente se analizan los datos obtenidos de las otras pruebas mencionadas en el apartado anterior para la mezcla óptima, es decir la que obtuvo mejor desempeño mecánico.

7.1. Resultados de Resistencia mecánica a la compresión

Los ensayos para esta prueba se realizaron por triplicado a cada una de las formulaciones propuestas, a edades de curado de 28 y 42 días, en la Tabla 8 se presenta el promedio de 3 mediciones para cada formulación:

Tabla 8: Resistencia Mecánica a la compresión

Formulación	RMC (MPa)		
	28 días	42 días	% Incremento
P.1	0.44	0.44	0
P.2	1.42	1.42	0
P.3	5.41	4.73	-13
P.4	6.84	5.33	-22
P.5	3.55	3.55	0
P.6	1.22	0.79	-35
P.7	3.38	2.28	-33
P.8	4.94	4.09	-17
P.9	5.33	3.98	-25
P.10	5.13	5.07	-1
P.11	1.09	0.91	-17
P.12	3.84	3.92	2
P.13	4.40	4.82	10
P.14	4.59	4.90	7
P.15	5.76	4.73	-18
P.16	1.20	0.71	-41
P.17	3.60	3.29	-9
P.18	5.39	5.64	5
P.19	4.22	5.42	28
P.20	3.16	3.98	26
P.21	0.44	0.86	95
P.22	1.45	1.39	-4
P.23	3.11	3.26	5
P.24	7.18	8.42	17
P.25	8.46	8.11	-4

Se observa que la mayoría de las formulaciones presentan disminución de RMC a los 42 días, este comportamiento puede ser originado debido a que algunos morteros a

pesar de haber fraguado y después del proceso de curado térmico siguieron desprendiendo polvo, lo que ocasionó que la forma de los cubos no fuera uniforme.

Este comportamiento se presentó principalmente en los morteros que se elaboraban a partir de mayor cantidad de CBCA, otro de los aspectos a resaltar fue la fluidez que las mezclas registraron como es el caso de las formulaciones P.11, P.16 y P.21, en las dos primeras se encuentra que existe una disminución drástica de resistencia y los valores que se obtuvieron son considerados despreciables, con respecto a la P.21 la resistencia incremento casi al doble, sin embargo los valores no alcanza ni 1MPa, esto es similar a los datos obtenidos por (Zúniga, 2014) en su primera etapa de elaboración de morteros los cuales están formado por un aglomerante por ceniza de bagazo de caña de azúcar activados con silicato de sodio e hidróxido de sodio.

Con respecto a las formulaciones formadas por 100% de CBCA tres de ellas no experimentaron ningún cambio en su resistencia en los tiempos de curados, los valores en este caso son variables y solamente se experimentó disminución, todos los morteros sufrieron desmoronamiento y una apariencia débil, esto puede ser atribuido a que existan muchos poros abiertos, otros de los factores es la alta demanda de agua que exige la ceniza para que la mezcla pueda ser trabajable.

Para las formulaciones de P.6 hasta P.10 están constituidas por 75% CBCA y 25% de P, estas presentan datos relativamente similares a los cinco primeros, pero existe un comportamiento al pasar el tiempo de curado todos los especímenes sufrieron una disminución de RMC, ya que los morteros presentaban fisuras y notoriamente se observaban poros abiertos en la superficie de los mismos, esto puede ser ocasionado por que la fuerza de compactación no fue suficiente para lograr que todas las aristas del cubo quedaran cubiertas.

A medida que en las mezclas se disminuía la cantidad de CBCA por P o C la mayoría de los especímenes presentaban mejoras en su resistencia, sin embargo existen casos en los que la RMC resultante fue baja, esto puede ser atribuido a que los componentes no se homogenizaron de la mejor manera, la fluidez de la mezcla fue excesiva, el curado térmico puede haber provocado deshidratación, y por lo tanto no se formaron completamente los productos de reacción necesarios para el desarrollo de resistencias apropiadas.

Los datos obtenidos de RMC en este estudio pueden ser comparados con investigaciones similares como es el caso de la investigación realizada por (Castro, 2014) en la que los valores de resistencia obtuvieron un valor máximo de 5.84MPa esto es muy parecido a los resultados que se registraron en la mayoría de las formulaciones, de igual manera para los resultados de las primeras 5 formulaciones en las que solo estaban formada por 100% de CBCA con C y activada por medio de SAN, se registraron aumento de resistencia a medida que se incrementaba la cantidad de C y SAN dicho comportamiento se presentó en las dos edades de curado planteadas.

En la Figura 19 se muestra el efecto que se produjo sobre la resistencia en dependencia de la cantidad de material aglomerantes y el activador utilizado para obtener el cemento base.

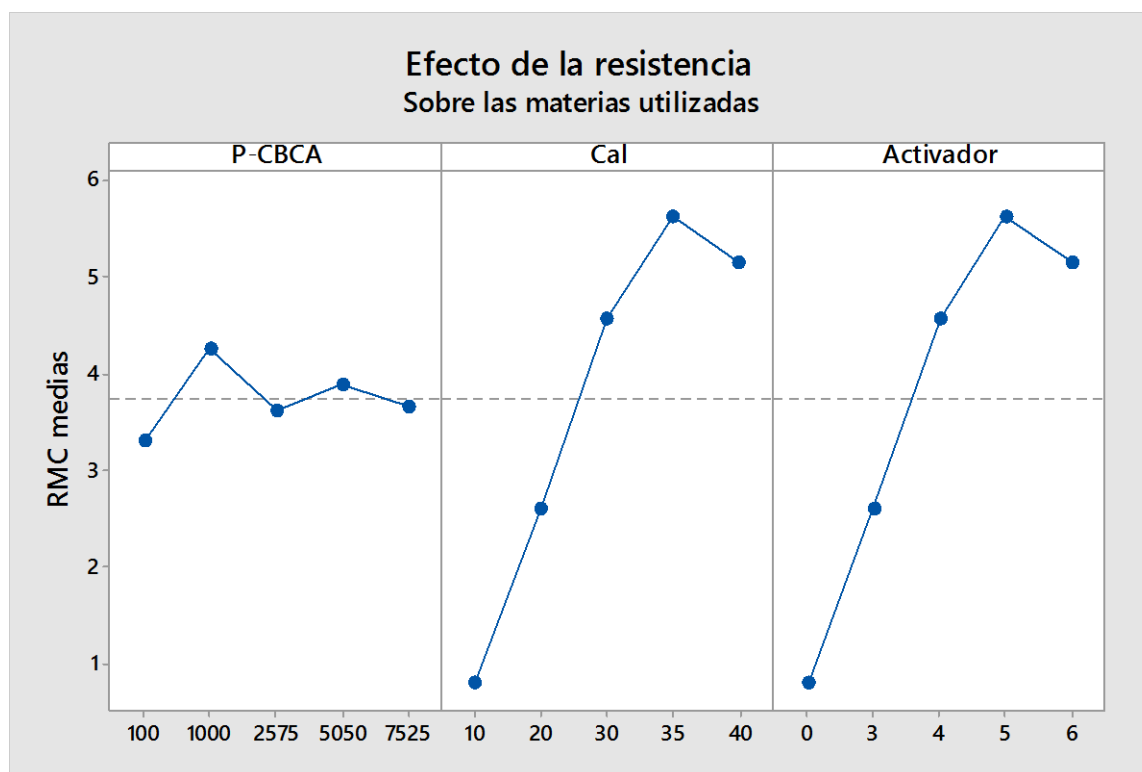


Figura 19: Efectos de RMC sobre las materias primas utilizadas

La Figura 19 indica que si la cantidad de CBCA disminuye se obtiene un valor mayor de resistencia, por lo que la formulación óptima es la que está formada por la relación de P/CBCA 100%, C 35% y SAN 5% que es la P.24, con datos de resistencias iguales a 7.18 y 8.46MPa a los 28 y 42 días respectivamente. La formulación P.25 presenta mayor resistencia que la P.24 a los 28 días, sin embargo a los 42 días su resistencia disminuye.

Además la Figura 19 presenta una discrepancia con los datos de resistencia obtenidos ya que si nos basamos por los resultados la mejor es la P.25, sin embargo la gráfica nos indica que es P.24, esto es ocasionado por las RMC de los especímenes cuando se emplea 35 y 5% de C y SAN respectivamente, son las mejores en comparación a las que se registraron cuando se emplea 40 y 6% de Cal y activador.

Para asegurar que el dato de resistencia obtenido en la formulación P.24 es confiable se aplicó la prueba de rechazo Q.

La prueba consiste en realizar en primera instancia la diferencia entre el valor en cuestión y su valor más cercano (a) y se divide entre el intervalo de la diferencia entre el valor en duda y el valor menor de la muestra (w), una vez obtenida la relación se compara con el valor tabulado a un determinado nivel de confianza, y si este es menor que el

estandarizado se puede considerar aceptable, matemáticamente se expresa por medio de la siguiente ecuación. (Christian, 2009)

$$Q = \frac{a}{w}$$

Realizando las diferencias correspondientes se obtiene lo siguiente:

$$a = 7.80 - 3.19 = 4.61$$

$$w = 7.80 - 0.65 = 7.15$$

$$Q = \frac{4.61}{7.15} = 0.645$$

Una vez que se tiene el valor de Q se compara con el tabulado para un nivel de confianza de 99% para un total de 5 muestra es 0.821.

$$0.645 < 0.821$$

Dado que el valor generado a partir de las diferencias es menor al tabulado, se puede considerar que el valor de resistencia obtenido en la P.24 se puede tomar como la formulación óptima.

Además a partir de los datos registrados se puede clasificar las mezclas por medio de la (NTON-12-008-09, 2011), la que ubica a la mayorías de las formulaciones no aptas a nivel estructural, sin embargo unas formulaciones que sus morteros obtuvieron resistencias que están el rango de no estructurales con resistencia mínima de 5.04MPa y solamente dos formulaciones se encuentran en la clasificación de bloques estructurales tipo 2.

7.2. Efecto del peso de las muestras sobre la resistencia mecánica a la compresión

En la Tabla 9 se presentan los pesos promedios por cada nivel con respecto a lo planteado en la Tabla 6, en la cual se observa que el peso va aumentando discretamente, indicando que en el nivel 4 se tienen los morteros con mayor peso con 0.225 Kg, pero esto no influyo en los datos de RMC.

Los peso de las probetas cubicas fueron tomadas a la edad de 28 días de curado, lo que puede ser considerado un factor a tomar en cuenta debido a que los cubos están más secos ya que se han desarrollo la reacción del agua con los demás componentes para dar origen a los productos de reacción, y otro de los parámetros puede ser la deshidratación sufrida por los mismo al momento del tratamiento de curado a temperatura a pesar que de que se simulo un ambiente de humedad a través de la utilización de paños húmedos.

Tabla 9: Peso de los morteros por cada nivel

Niveles	Peso	RMC 28	RMC 42
1	0.194	3.534	3.092
2	0.211	4.001	3.242
3	0.224	3.935	3.856
4	0.225	3.513	3.807
5	0.223	4.129	4.407

En la Figura 20 se muestra el comportamiento de la resistencia con respecto al peso a los 28 días de curados, en la que se observa que existe dispersión en los datos, esto se fundamenta debido a que no poseen un comportamiento lineal, además se presentan aumento y disminución de resistencias en los distintos niveles, pero siempre se identifica que a pesar del peso obtenidos en las formulaciones que conforman el nivel 5 la resistencia sigue siendo la mejor.

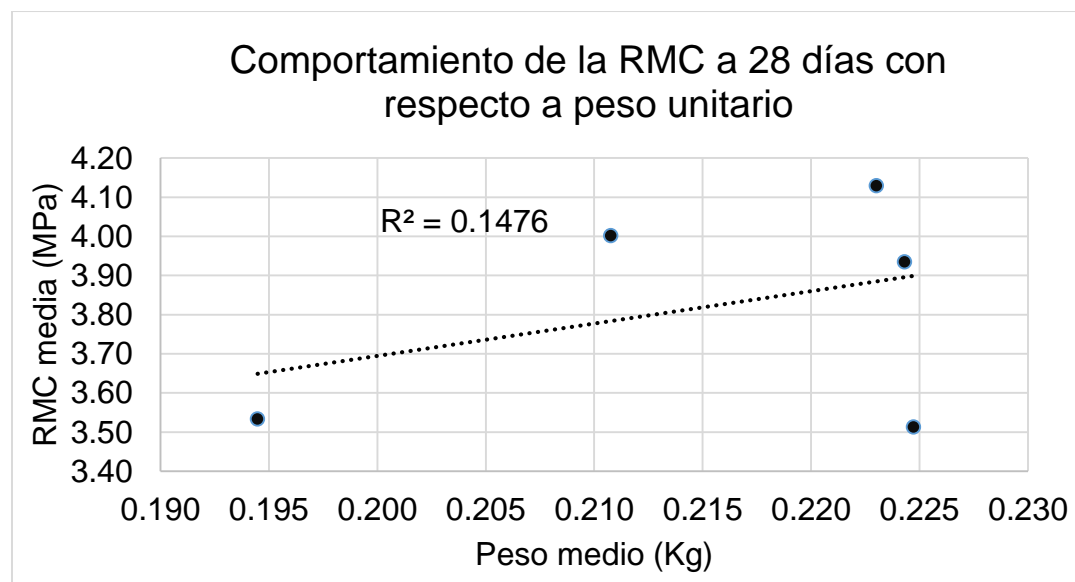


Figura 20: Comportamiento de resistencia a los 28 días respecto al peso de los morteros

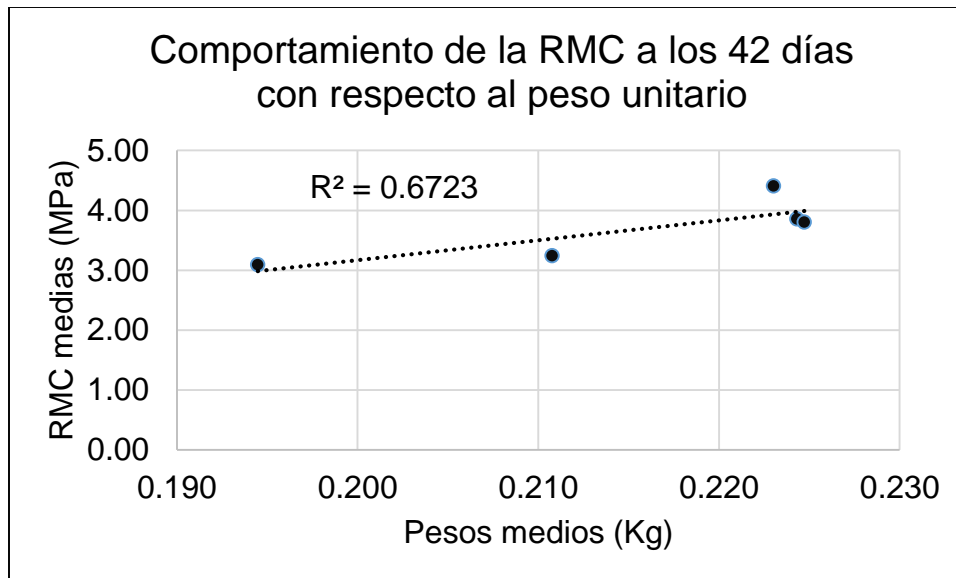


Figura 21: Comportamiento de RMC a los 42 días con el peso unitario de los cubos

En la Figura 21 se muestra que los pesos de los cuatros primeros niveles van en aumento de la misma manera que la resistencia, en el último nivel se observa que el peso de los cubos disminuye sin embargo la RMC sigue aumentando, reportándose que los mejores resultados están el nivel 4 y nivel 5 para el peso y RMC respectivamente, además el gráfico proporciona que los datos no poseen un comportamiento lineal, ya que estos se encuentra dispersos.

La pérdida de humedad ocasiona que el peso de los morteros sea variable en las diferentes formulaciones tomando como referencia la Tabla 7 se puede afirmar que las probetas cubicas formados por 100% de P con 0% CBCA y diferentes porcentajes de Cal y SAN, esto se debe a que la piedra pómez es un material ligero y cal no aporta demasiado peso a los cubos, sin embargo la apariencia de estos no se notaba con fisuras o estructura débil exceptuando los cubos de la formulación P.21, esto debido a que la mezcla quedo bastante fluida.

Otros de los niveles en los que se observó bajos pesos es el primero a pesar que contenían 100% CBCA que es un material voluminoso pero su demanda de agua ocasiona que los cubos presentaran una estructura débil ocasionando desmoronamiento y por ende pérdida de peso al paso de los días.

En los niveles 2, 3 y 4 se experimentó aumento discreto de peso se pueden tomar como referencia que la evaporación de agua fue poca lo que ayudo a que la superficie del cubo no sufriera muchas fisuras, pero en algunos de los morteros se presentaron fisuras o presencia de poros abiertos por lo se puede suponer que existen vacíos.

7.3. Resultado del ensayo de tiempo de fraguado

El ensayo de tiempo de fraguado se realizó a partir del aparato de Vicat, a dos pastas las cuales son consideradas las de mejor desempeño mecánico según los efectos principales a la RMC, dicha prueba se basó en la norma (ASTM-C-191, 2008).

Para iniciar el ensayo de fraguado de las pastas se procedió inicialmente a determinar las consistencias normales de las mezclas.

Formulación P.15

La consistencia normal de la P.15 se determinó siguiendo los pasos de la norma (ASTM-C-187-11E1) debido a que los cementos que se obtienen a partir de materiales puzolánicos no poseen normas para la determinación de este ensayo.

La consistencia normal de la P.15 es de 80% con una penetración de 9mm refiriendo en la norma técnica, la consistencia no se encuentra entre los rangos, esto se debe a que la demanda de agua que exige la CBCA es mucha para que la pasta sea trabajable.

Una vez determinada la consistencia normal se procedió a realizar la prueba de tiempo de fraguado inicial y final de la pasta.

En la Figura 22 se muestra la pérdida de plasticidad de la pasta de la formulación P.15 con respecto al paso del tiempo.

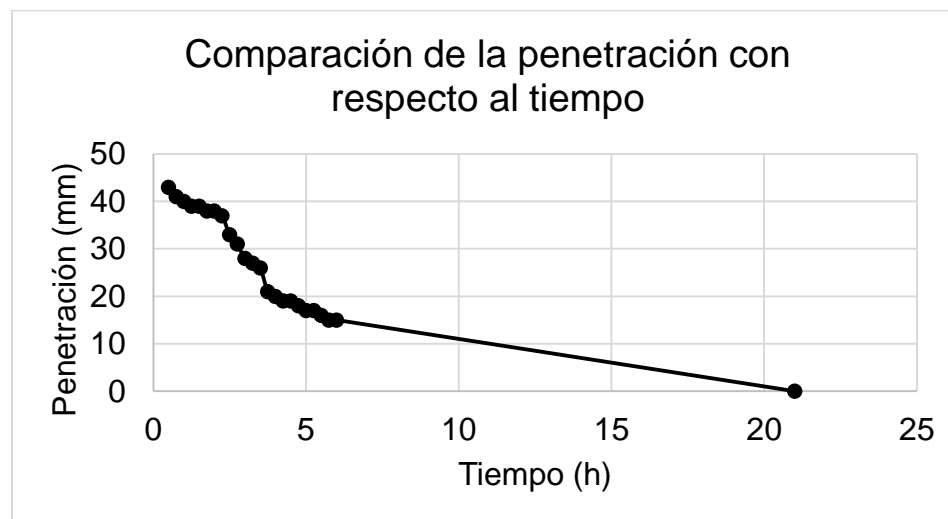


Figura 22 Tiempo de fraguado de la formulación P.15

El fraguado de la pasta de la formulación P.15 fue de desarrollo lento en comparación con los tiempos de fraguado del cemento comercial que oscila entre 45 a 60 minutos el inicial mientras tanto que el fraguado final es de 10 horas aproximadamente.

A pesar de que se realiza la comparación entre el cemento comercial y el cemento obtenido se sostiene que el fraguado es lento, debido a que las reacciones de hidratación de la pasta van en dependencia de la velocidad con que reaccione el activador con las

materias que forman el aglomerante, la concentración o porcentaje del dicho activador. (Krivenko, Shi, & Roy, 2006).

Es decir que el fraguado se ve afectado directamente por la concentración de activador o la naturaleza de este.

En la Figura 22 se aprecia el resultado que el fraguado inicial de la P.15 es de 3.55 horas (213 minutos) dicho valor es calculado por interpolación, aunque también se puede considerar como punto inicial el de 3.75 horas (225 minutos) debido a que en ese tiempo la penetración es igual a 21 mm y con ese valor se cumple con lo que plantea la norma (ASTM-C-191, 2008)

Para la determinación del tiempo de fraguado final no pudo ser exacta debido a que no se tiene acceso al laboratorio después de la 4 de la tarde, sin embargo se puede suponer que el tiempo es de aproximadamente de 21 horas (1200 minutos), las pastas fueron trasladada a un lugar donde se pudiera ver su pérdida de plasticidad pero esa determinación fue visual y se determinó a partir del tacto, debido a que no contaba con el aparato de vicat.

Formulación P.24 (Formulación óptima)

Para determinar la consistencia normal de esta fue necesario utilizar la norma (INEN-242, 1997-02), que plantea la consistencia normal de la cal hidratada, fue tomada en consideración de esta manera debido a que esta pasta estaba formada por 100% de P con 35% C ya que la cantidad de cal utilizada influye en la trabajabilidad de la pasta.

Realizando el ensayo de consistencia normal se determinó que esta es de 72% estando por debajo de lo planteado en la norma de la consistencia de la cal hidratada, este comportamiento se atribuye a que en la mezcla existe la presencia de P, con una penetración de 17mm por un lapso de 30s.

Una vez determinada la consistencia normal se procedió a realizar la prueba de fraguado, en la Figura 23 se muestra el comportamiento que presento la pasta con respecto al paso del tiempo.

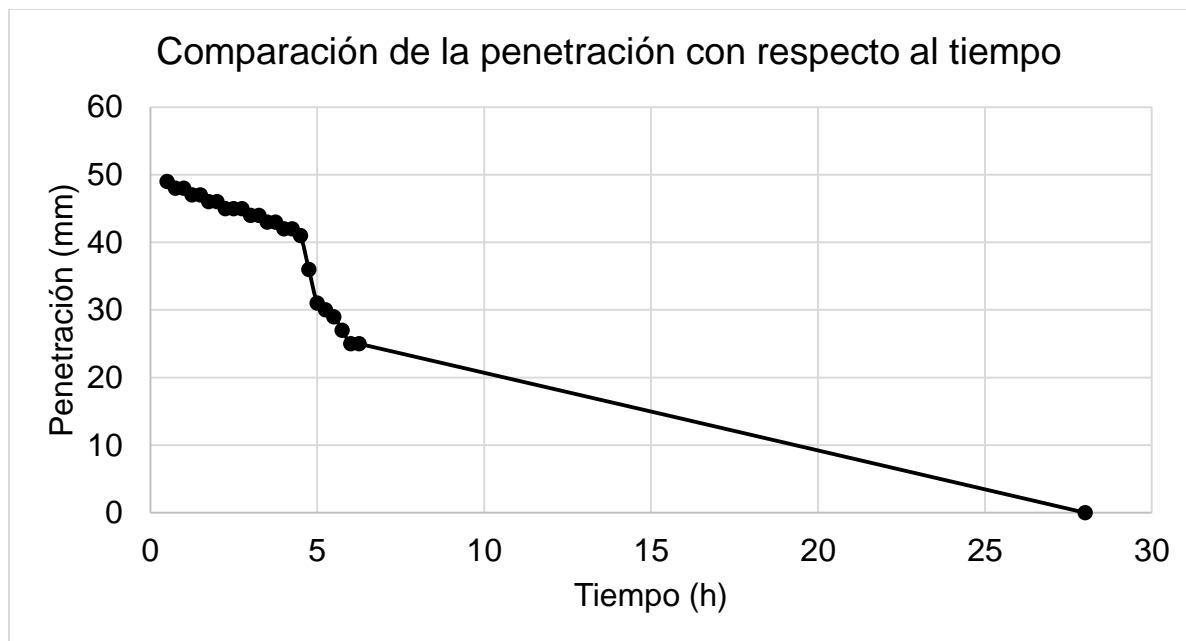


Figura 23 Tiempo de fraguado de la formulación P.24

La pérdida de plasticidad de la pasta P.24 fue lento esto debido a la cantidad de cal utilizada, y a la consistencia de la misma, además se observa que plasticidad de esta se mantenía constante en algunos intervalos lo que provoco que el tiempo de fraguado inicial se prolongara en comparación al obtenido por la P.15, dicho tiempo fue de 6.25 horas (375 minutos).

Para determinar el tiempo de fraguado final se presentó el mismo inconveniente del cierre del laboratorio y se puede aproximar a unas 28 horas (1680 minutos), debido a que en la pasta se observaba seca y al realizar por medio del tacto no quedaba ninguna huella en la superficie de la misma.

Uno de los factores que es determinante para que se pueda acelerar el tiempo de fraguado de la pasta es la temperatura, es decir que a temperatura ambiente el compuesto que tiene la capacidad de endurecer la mezcla se forma de manera lenta por lo que es necesario el empleo de temperaturas de curado diferentes a la ambiente teniendo en cuenta que esta no sea demasiada elevada para no provocar defectos en las mismas. (Djwantoro, Chua, Cheak, & Carrie, 2008)

En el estudio de (Arias & Mercado, 2015), reportaron que el tiempo de fraguado de su pasta fue lento llegando a reportar 9 horas para el inicial mientras que el final era aproximadamente 23 horas lo cual indica que el fraguado de la pasta de P.24 es similar al obtenido por ellos.

7.4. Resultados del Ensayo del porcentaje de Absorción

El ensayo de absorción se realizó siguiendo los pasos descritos en la norma (ASTM-C128), prueba que se aplicó a la formulación optima (P.24) y la segunda mejor (P.15), los morteros utilizados se elaboraron de la misma manera que se describió en la

metodología aplicándoles el tratamiento térmico por dos horas a una temperatura de 50°C un día después de elaborados los cubos. El ensayo se realizó a la edad de curado de 28 días para ambas formulaciones.

Los datos obtenidos a partir del análisis se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10 Datos del porcentaje de absorción de agua en morteros de las formulaciones en estudio

Formulación	Muestra	Peso Sat (g)	Peso Seco (g)	% Absorción
P.15	PM1	250	218	14.68
	PM2	266	200	33.00
	PM3	250	200	25.00
P.24	PM1	260	200	30.00
	PM2	248	200	24.00
	PM3	264	216	22.22

Para cada uno de los tres morteros sometidos al ensayo, en la que se puede observar que los valores que se obtuvieron el porcentaje de absorción mayor es de 33% para la muestra de la formulación P.15 que está formada por 50% de CBCA, 50% de P, 40% de C, activada con un 6% de SAN, sin embargo los valores para esta formulación presentaron aumentos y disminución de más de 8% en absorción esto nos indica que a pesar de estar formados por la misma cantidad de materia, pueden existir mayor cantidad de poros abiertos lo que trae consigo mayor cantidad de absorción de agua.

Para los cubos de la formulación P.24 se presentó una disminución en relación a cada una de las muestras sometidas al ensayo reportándose una absorción máxima de 30% al finalizar la prueba, a pesar de que la superficie de estos no se apreciaban poros la cantidad de agua absorbida fue mayor en comparación a los de la formulación P.15, luego puede atribuirse a que internamente la estructura del cubo no se encuentra bien compactada, esto es debido que en la compactación manual no se aplica la misma cantidad de fuerza en los distintos golpes que se aplican a la mezcla al momento del moldeado.

7.5. Resultados de Ensayo de carbonatación

Este ensayo se realizó en dos partes:

Primeramente a los cubos expuestos a la solución de CS por un 1 y 5 días se les aplico la fenolftaleína en la cara exterior del cubo para observar el comportamiento de estos, posteriormente a los cubos se les realizo un corte para observar el avance de la carbonatación a lo interno.

Primera parte del ensayo de carbonatación.

Esta se realizó sobre la superficie de los morteros efectuando tres medidas para observar el comportamiento de los cubos con respecto a la carbonatación de los mismos, para ambas formulaciones.

Formulación P.15

Para las tres medidas sometidas a un día de carbonatación se observaron que la mayor parte de la arista se tornó de color de púrpura lo cual indica que no existe carbonatación en dicha superficie, sin embargo se presentaron segmentos en los cuales el cubo no experimentó ningún cambio de color pero no tiene una forma uniforme, por lo cual es difícil medir su longitud, pero se puede decir que la longitud oscila entre los 1 a 1.5 cm.

En una de las mediciones se notaron tres zonas diferentes de color, en los bordes de la arista se presentó un color púrpura indicando que no existe carbonatación, mientras que en la superficie de la cara se notó unas pequeñas circunferencias en las se mantuvo el color original del cubo lo que indica que el pH es menor a 8 y por lo tanto existe el fenómeno de carbonatación, por otro lado la parte de la superficie experimentó un color rosado pálido lo que indica que el pH oscila entre 8 a 9.5.

Cuando los cubos fueron sometidos a un mayor tiempo de exposición se experimentó carbonatación en la parte superior de la arista con una profundidad que oscila entre los 2 y 3 cm de longitud la parte restante presentó una tonalidad de rosado pálido es decir un pH de 8 a 9.5, el incremento de la profundidad de la área carbonatada es atribuido al tiempo de exposición a que se expuso a los morteros, ya que a las 24 horas no se notaba un cambio significativo.

Formulación P.24

Un dato importante en los cubos de esta formulación es que después de haber sido expuestos a la solución de CS se observó una estructura con pequeñas grietas en la superficie de los mismos.

En las mediciones realizadas a los morteros de la esta formulación se notó que el color que se produjo al momento de la aplicación de la fenolftaleína es rosado en toda superficie para la primera medición la presencia de carbonatación es baja, para una segunda prueba se observó que en unas de las esquinas de la superficie roseada con el indicador no experimentó ningún cambio de color lo que indica que existe un avance de la carbonatación en los morteros al estar expuesto a la solución de CS.

Para el análisis de la resistencia a la carbonatación se registró el peso de los cubos antes y después de la exposición a la solución con el propósito de conocer cuál era el porcentaje que absorbían de esta durante las 24 horas que estuvieron expuestos.

En la Figura 24 se muestra el porcentaje de absorción con respecto a los cubos de cada una de las formulaciones que fueron expuestas a la solución de CS, en que se puede concluir con respecto a los datos promedio de cada formulación, los cubos

pertenecientes a la formulación P.24 absorben mayor cantidad de solución en comparación a los P.15, lo mismo que ocurrió en el ensayo del % de absorción de agua, esto quiere decir que la estructura de la P.15 se encuentra con menos poros abiertos debido a que la estructura interna de esta mejor compactada.

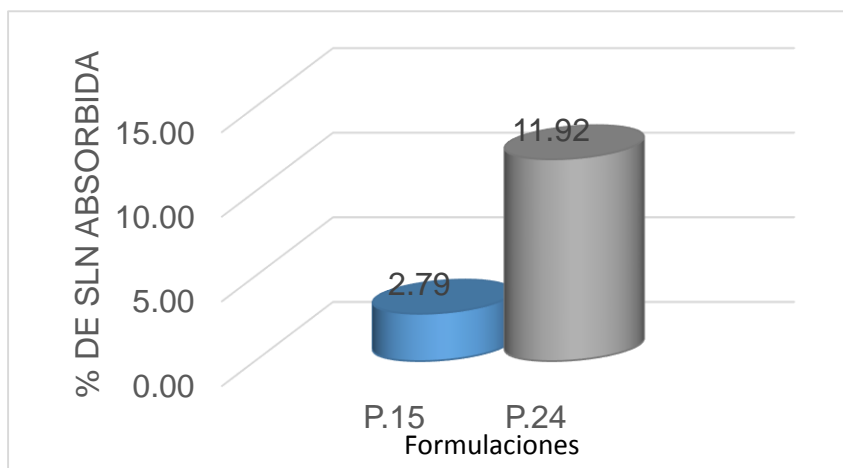


Figura 24 Porcentaje de Absorción de los cubos

Segunda parte del ensayo de carbonatación

En esta sección se explicaran los resultados obtenidos del análisis del ensayo de carbonatación que se realizó en la parte interior de cubos de cada una de formulaciones (P.15 y P.24) en estudio.

Para este análisis se tuvo que realizar un corte transversal (45°) por medio de un Metao marca Truper modelo ESMA-4-1/2 A3 con una capacidad de rotación del 11,000 r/min, una vez realizado el corte se procedió a la aplicación del indicador a las dos mitades obtenidas. A continuación se detallan los resultados registrados.

Formulación P.15

A las dos mediciones efectuadas se observó que el color generado a partir de la aplicación del indicador toda la superficie expuesta se tornó purpura con la presencia del fenómeno de carbonatación en forma de manchas en toda la superficie que no poseían una forma uniforme con una longitud de aproximadamente de 1mm.

Al realizar el análisis sobre los cubos que permanecieron 5 días sumergidos en la solución de CS no se observaron cambios significativos, ya que de igual manera la superficie presento manchas pequeñas que no cambiaron de color y el color del área en estudio fue purpura es decir pH de 9.5 o mayor, como se aprecia en la Figura 25.



Figura 25. Apariencia del mortero después de la aplicación de Fenolftaleína

Formulación P.24

En las áreas a las que se aplicó fenolftaleína para las dos mediciones se notaron un comportamiento similar ya que solamente en las extremos de la superficie experimentaba el proceso de carbonatación, pero existía una diferencia con respecto a las longitud registradas, para la primera medición de obtuvo un avance de la carbonatación de 3cm mientras que en la medición número dos se presentó en la superior del borde con una longitud de 0.3cm y el borde inferior con una penetración de 0.5cm.

También es importante resaltar que la aparición del color purpura se dio en el centro de la superficie es decir no fue carbonatada, al igual que en dichas mediciones se tornaron de color rosado pequeños segmentos de los bordes izquierdo y derecho.

Para los cubos expuestos por 5 días a CS se notó que el fenómeno de carbonatación en los bordes extendiendo sobre toda la longitud de estos es decir que la penetración 5 cm con un ancho de 0.8 cm toda la superficie incolora, también se observó que en centro de la área no fue afectada ya que su coloración fue rosado pálido indicando que el pH está comprendido entre los 8 a 9.5. En la Figura 26 se observa lo antes descrito.



Figura 26 Apariencia de los cubos de la Fop después de la aplicación de Fenolftaleína

7.6. Resultados del Ensayo de Fluidez.

Esta prueba se realizó para determinar cómo se comportaba las mezclas a medida que disminuía la cantidad de CBCA en la mezcla y esta era sustituida por cada uno de las distintas materias que formaban el aglomerante en los distintos niveles.

Una vez realizada la mezcla con una relación de a/l constante de 0.8 se procedió a la determinación de la fluidez de misma según la norma esta debe estar en un rango mínimo de 105 hasta de 115 %.

En la Figura 27 se presenta la fluidez registrada por cada una de las mezclas que se elaboraron.

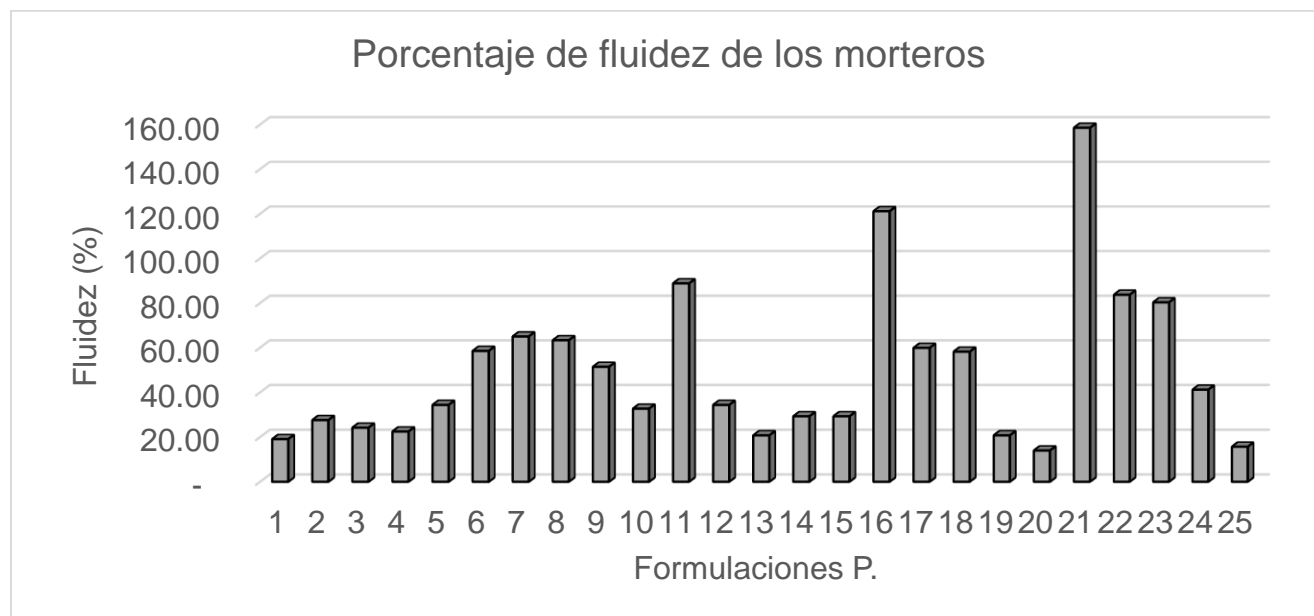


Figura 27 Comportamiento de Fluidez en las mezclas.

La Figura 27 muestra la fluidez de cada una de las formulaciones, en la que observa que existen formulaciones que se registraron flujos pequeños como es el caso de P.1, P.20 y P.25 estas tres mezclas no llegaron a un valor de 20% de fluidez, para la P.1 se puede atribuir a que esta es elaborada a partir de 100% de CBCA y 10% de C dado que la ceniza demanda una mayor cantidad de agua pero esta se mantuvo constante para todas mezclas además que en esta no se empleó SAN lo que pudo ocasionar que las reacciones entre los aglutinantes ocurrieran más lentamente.

Además se observa que la mayoría de las mezclas el valor de la fluidez se encuentra por debajo de 70% esto se puede atribuir a que la CBCA absorbía el agua utilizada y posteriormente ocurría sangrado como paso con las mezclas P.9, P.15, P.18, otra que presentó igual comportamiento fue la P.22 a pesar de registrar un valor de 83.67% y no tener ceniza en la mezcla.

Para las formulaciones P.11, P.16 y P.21 se registró el mayor porcentaje de fluidez en las tres mezclas contenían P lo ayudó un poco a mejorar la trabajabilidad de los morteros, sin embargo esto ocasionó una disminución drástica de la resistencia y la estructura de los mismos, para la formulación P.21 registró el valor más alto de fluidez con un 158.50% esto trajo como consecuencia que después de 24 horas los morteros estuvieran en estado fresco, posteriormente se sometieron al curado térmico por 2 horas y todavía se notaba que la superficie de los cubos estaba blanda, la solidificación de los mismos se dio hasta ya pasada las 2 horas después de haber sido sometido a temperatura.

La disminución de la cantidad de CBCA utilizada en las formulaciones presentó una mejoría en la trabajabilidad por lo tanto la fluidez aumento esto se puede atribuir a la adición de la P como se muestra en la Figura 28.

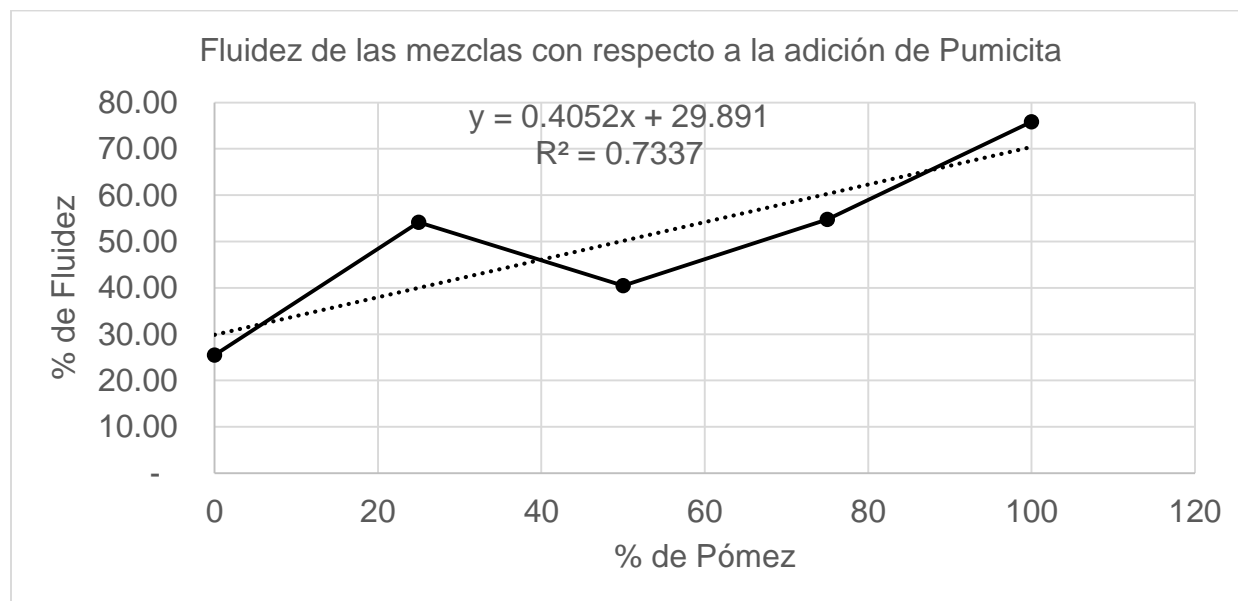


Figura 28 Comportamiento de la Fluidez con respecto a la adición de Pumicita

A medida que se sustituye la CBCA por P se presenta un incremento en los datos promedios de fluidez para cada uno de los niveles exceptuando cuando se emplea un 50/50% de CBCA/P se experimenta una disminución, esto se puede atribuir al equilibrio en las cantidades de las materias primas principales, donde la ceniza mantiene el mismo comportamiento de absorción de agua lo que provoca la lentitud de la reacción de hidratación de las mezcla.

Cuando se utiliza un 75% de P se da un incremento en la fluidez y esto se puede afirmar dado que la humedad de las mezclas se mantuvo desde el momento que se finalizó el proceso de mezclado hasta que se realizó el ensayo además esto se ve reflejado en los resultados de resistencia, aunque en este nivel se presentó uno de los más altos resultados de fluidez como es el caso de P.16 provocando que la estructura fuese débil y por ende RMC baja.

Al utilizar solamente P se da un incremento considerable en el flujo de las mezclas y no se presentó una pérdida rápida de plasticidad de los morteros lo que dio lugar a minimizar errores al momento de realizar el ensayo

En general la mayoría de las mezclas a pesar de registrar fluidez baja se observaron con una apariencia húmeda y se podía trabajar para realizar el ensayo de fluidez y posteriormente el colado en los moldes.

La fluidez se ve afectada por la adición de Cal en la mezcla esto se refleja en la Figura 29.

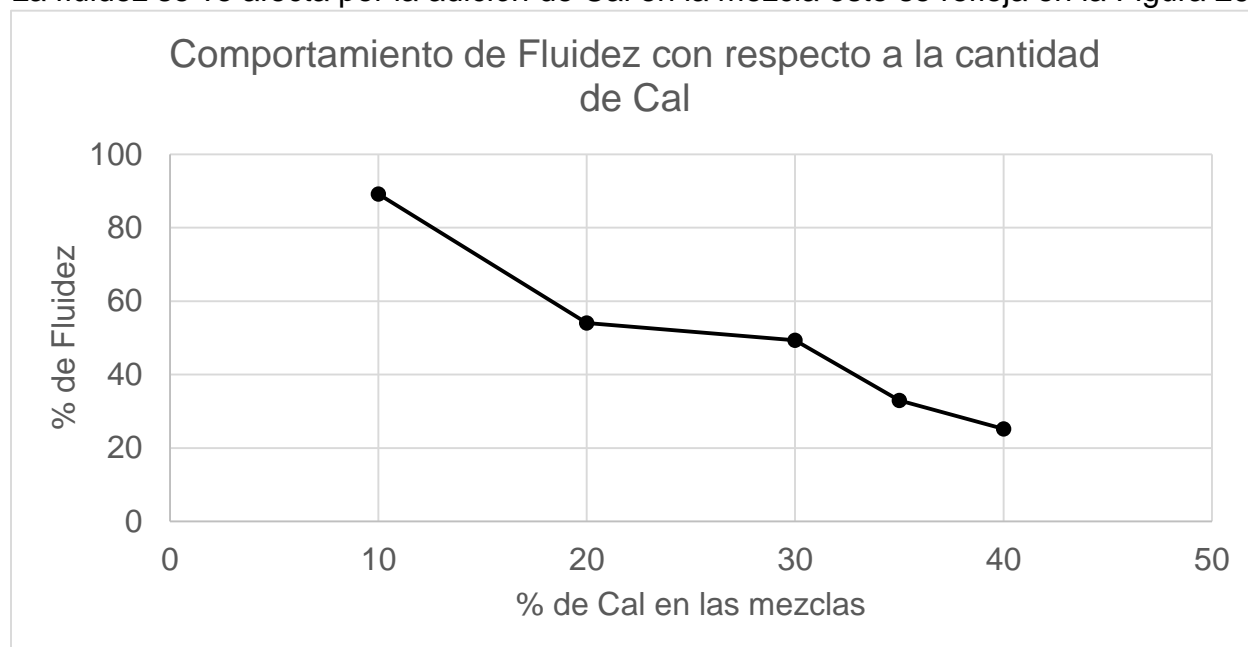


Figura 29 Comportamiento de % de Fluidez con respecto al % de Cal

La Figura 29 muestra que a medida que aumenta el porcentaje de cal en la mezclas, la fluidez decrece, como se reflejado para el nivel 1 en donde se emplea una cantidad de 10% (% en peso) de Cal se registra el valor mayor de fluidez de 89.18, seguidamente al aumentar a 20% se presenta una disminución hasta 54.08%, al adicionar 30% las mezclas obtuvieron una fluidez de 49.32%, al utilizar un 35% se reportó un valor de fluidez de 33% y el ultimo nivel que corresponde a 40% de Cal la fluidez es la menor con un valor de 25.17%.

Al adicionar un 40% de C se observó el comportamiento que la mezcla quedaron húmedas pero con cierta dificultad para ser moldeada debido a que esta presentaba una textura pegajosa y por lo tanto no se desplaza con facilidad por la mesa de fluidez.

En los niveles anteriores este comportamiento no se presentó ya que la presencia de la CBCA y P contribuían a la estabilidad de la mezcla.

Este mismo comportamiento se observó en los trabajos realizados por (Castro, 2014) y (Arias & Mercado, 2015), los cuales plantean que dicho fenómeno se debe a la naturaleza química de la Cal como un material higroscópico y algunas propiedades físicas como la humedad, finura y densidad.

7.7. Resultados del Análisis de Espectroscopia Infrarroja por medio de Transformada de Fourier para las pastas selectas

Este análisis se realizó como se describió en la sección 6.2.5

Espectro IR de la Formulación óptima (Fop: P.24)

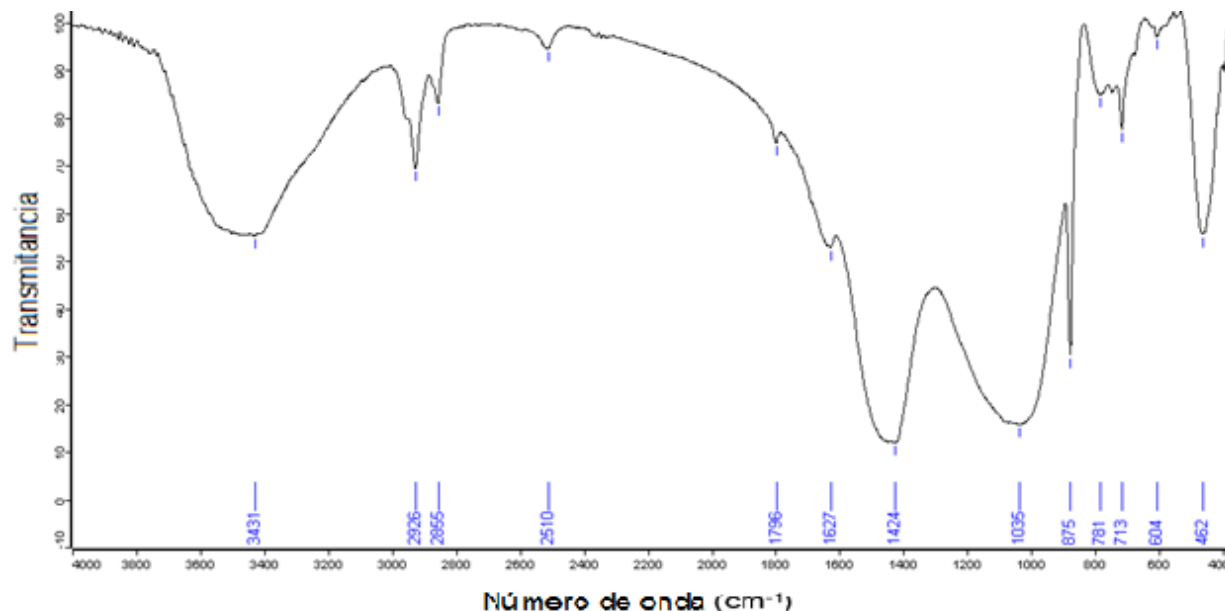


Figura 30 Espectro IR de la pasta de la Fop a la edad de 28 días

La Figura 30 nos muestra el espectro de la Fop a la edad de curado de 28 días en la que se observan las diferentes bandas de vibraciones que nos indica la formación de los distintos compuestos que caracterizan a las mezclas cementantes.

Como es usual en la banda de los 3431 cm^{-1} y 3000 cm^{-1} se encuentra la vibración del enlace O-H en forma de agua fisisorbida esto nos indica que todavía existe agua sin reaccionar y por lo tanto se puede considerar que se pueden originar mayores reacciones con el paso del tiempo lo cual puede traer consigo mayor resistencia a la mezcla.

Los hombros que se aprecian al número de ondas de 2926 cm^{-1} , 2855 cm^{-1} y 2510 cm^{-1} corresponden a presencia de CaCO_3 como calcita en las dos primera bandas dado su vibración con respecto al último hombro se puede atribuir a la vaterita ya se encuentra con una vibración débil, sin embargo luego se presenta una banda de vibración ancha hasta los 1796 cm^{-1} originada por el misma vaterita. (Piqué & Vásquez, 2012)

En la banda que se muestra un hombro en 1627 cm^{-1} nos indica que el agua se encuentra unida a otros compuestos como puede ser el caso de sulfatos en forma de etringita basando en los estudios realizados por (Vásquez & Blanco, Tabla de frecuencias y espectros de absorción infrarroja de compuestos relacionados con la química del cemento, 1981).

Con respecto al hombro que se forma entre los 1424 cm^{-1} y 1035 cm^{-1} es donde se da la formación a mayor escala de la $3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ esto se le atribuye a las vibraciones que sufre ion SO_4^{2-} aportado a través del SAN.

En la banda de vibración que se extiende desde los 1000 cm^{-1} hasta aproximadamente los 950 cm^{-1} donde se da la formación de un hombro invertido ocasionado por la producción de gel de sílice (tobermorita), posteriormente se nota una vibración en los 875 cm^{-1} ocasionado por la presencia de Alita ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_3$).

En el análisis realizado se muestra una banda que se extiende de 781 cm^{-1} hasta los 713 cm^{-1} en la cual se forma un hombro entre esas dos números de ondas se encuentran CaCO_3 lo que puede dar origen a los aluminatos cálcicos.

Luego se presentan vibraciones en los 604 cm^{-1} y 462 cm^{-1} las cuales se atribuyen que no todo el SiO_4 se agotó, lo cual proporciona la posibilidad que con el paso del tiempo se produzcan más reacciones para el beneficio de la resistencia de los morteros, sin embargo no haber observado el hombro característico de Portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ya sea porque esta haya reaccionado toda en el transcurso de los 28 días que no es probable o que las vibraciones de las bandas sean pequeñas lo que provocó que no se reflejaran notoriamente en el espectro generado.

Espectro IR de P.15

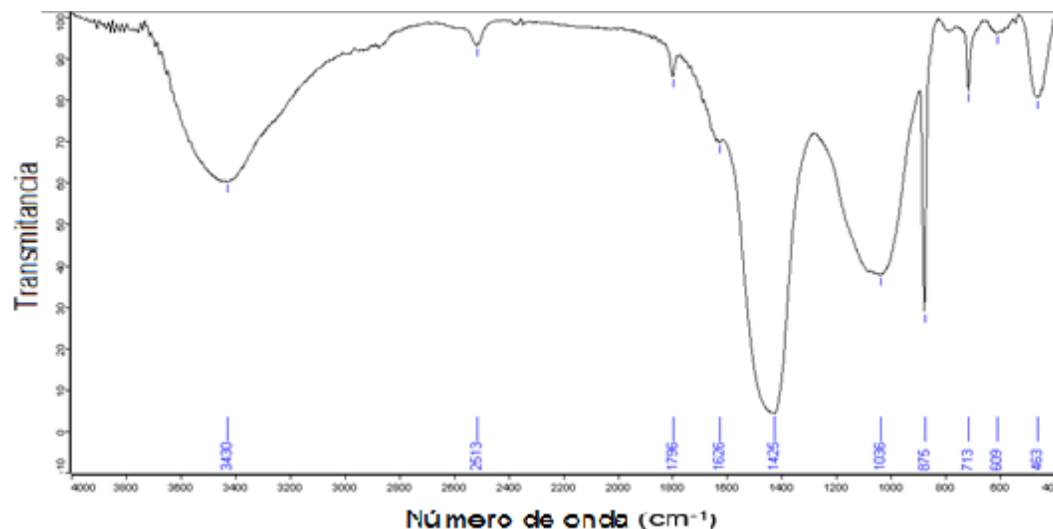


Figura 31 Espectro IR de la pasta de la P.15 a la edad de 28 días

El espectro de la formulación P.15 considerada como la segunda mejor con respecto a los efectos principales de las materias primas en base a la resistencia de los morteros se muestra de manera similar al de la Fop como se puede observar en la Figura 31.

Con unos leves cambios con respecto al desplazamiento de los hombros o las extensiones de las bandas, lo cual indica que se generaron aproximadamente los mismos productos de reacción de la Fop.

Como era de esperarse el enlace O-H que se encuentra en la banda ancha de los 3430 cm^{-1} indicando la presencia de agua y dando como dato que se pueden seguir dando origen a otras reacciones con el paso del tiempo, a pesar que siempre la banda se extiende considerablemente el hombro que se generó es un poco menos ancho en comparación a la Fop esto puede estar limitado por la presencia de CBCA en la pasta.

De igual forma se presenta la banda ancha característica de CaCO_3 pero un hombro pequeño en los 2531 cm^{-1} pero no se podría distinguir que tipo de compuesto es debido a la baja intensidad con la que se reflejó, sin embargo en los 1796 cm^{-1} se presenta un hombro pequeño pero con una vibraciones considerables en los que se puede atribuir a vaterita formada debido al proceso de carbonatación natural del cemento.

En los 1660 a 1640 cm^{-1} es la escala de número de onda característica del agua considerada enlazada químicamente, lo que indica la formación de productos de la clase de silicatos cálcicos y derivados del ion SO_4 es decir los sulfoaluminatos cálcicos. (Vásquez & Gauna, Contribución al estudio de las reacciones de hidratación del cemento portland por espectroscopía infrarroja, 1980).

Se originó un hombro entre los números de ondas de 1425 cm^{-1} correspondiente a CaCO_3 y el segundo a los 1036 cm^{-1} evidenciando la formación de etringita producto de la reacción de sulfatos con el agua que se encuentra enlazada químicamente a ellos, la intensidad del hombro formado a partir de las vibraciones se observa bastante amplio lo que puede explicar el motivo por el cual se observaron pequeñas fisuras en la superficie de los morteros de igual manera esto pudo haber perjudicado el desarrollo de la RMC .

En esta pasta se dio que el fraguado de la misma se produjo en menor tiempo con respecto a la Fop esto se puede atribuir a hombro que se aprecia con mayor intensidad en esta pasta en la banda de 1036 cm^{-1} y 875 cm^{-1} debido a una mayor producción de tobermorita y la producción de C_3S con una intensidad mayor en la número de onda de 875 cm^{-1} indicando que la disolución de la Alita dando como resultado el fraguado acelerado de la pasta como se explicó anteriormente.

Es notorio que la banda del número de onda de 713 cm^{-1} presenta una vibración mayor de CaCO_3 indicando que existe mayor cantidad de este producto en esta pasta, lo que hace suponer el desarrollo de productos de reacción futuros puede darse con el transcurso del tiempo pero no se sabe ciertamente si este reaccionara o ya es un producto determinado.

Comparación de Fop con P.15

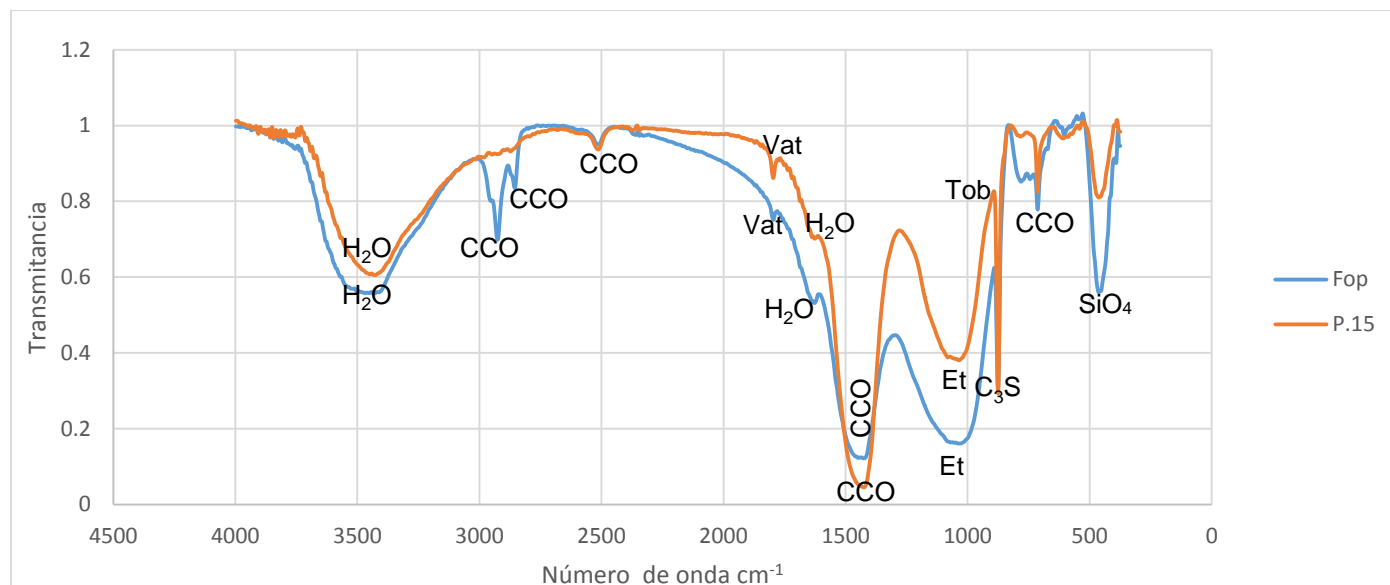


Figura 32 Espectro IR de la pasta de la Fop y P.15 a la edad de 28 días

En la Figura 32 se puede observar que se originaron los mismos productos de reacción en las dos pastas analizadas, pero estos aportaron de diferente manera a las propiedades físicas de los morteros, esto se puede atribuir a la intensidad con la que se reflejan en el espectro, como es el caso del pico que generó en los 1036cm^{-1} y 1035cm^{-1} que corresponde a la etringita, se puede decir que el halo del pico nos explica que esta se formó en mayor proporción para la P.15 y se puede afirmar debido a que los morteros de esta formulación sufrieron algunos daños como la aparición de pequeñas fisuras, otro de los aspectos que fundamenta la afirmación que la Et está presente en una cantidad considerable es el tiempo en que fraguaron las pastas ya que para Fop la pasta tardó aproximadamente 28 horas lo que puede explicar la disminución en el pico de esta.

Es importante destacar la formación de C_3S , Et y Tob ya que estos tres productos de reacción indican que las materias que formaron el aglomerante al entrar en contacto con el agua se inició la hidratación de la mezcla y se pudieron desarrollar las propiedades cementantes que se esperaban en el cemento para que este sea útil.

Se presenta que en dos espectros CCO en varios números de onda esta puede haber sido formada por la reacción de la C con el dióxido de carbono de la atmósfera, posteriormente este compuesto pueda dar origen a otros productos al reaccionar con el H_2O enlazada químicamente presente en el rango de 1640 a 1650cm^{-1} dando origen a los sulfoaluminatos cálcicos que son importantes ya que estos aportan a que la estructura

del cemento sea estable al momento de la realización de la mezcla, siempre y cuando no se produzcan en exceso y provoquen deterior en los morteros como es el caso de la Et.

Para las vibraciones que dieron origen a SiO_4 lo cual podrían indicar que con el paso de tiempo pueden darse más reacciones y contribuir a mejorar significativamente la RMC, la cual podría verse limitada ya que a la edad de 28 días de curado el espectro IR para la Fop y P.15 no muestra la presencia de Ca(OH)_2 lo que limita la posibilidad de incremento en la resistencia.

VIII. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos y el análisis que se realizó basado en las distintas pruebas aplicadas al cemento elaborado se puede concluir lo siguiente:

La evaluación de los efectos de la C y SAN fue esencial para la determinación de la cantidad que era adecuada para activar las propiedades cementantes tanto de la CBCA y P, y así poder obtener el aglomerante, en base a los resultados lo que benefician dichas propiedades es cuando se emplea un 35% C y 5% de SAN debido a que al utilizar estos porcentajes la resistencia de los morteros se incrementa, por el contrario al emplear 10% de C con 0% de SAN las resistencias generadas son despreciables.

La identificación de los productos de reacción fue una de las partes principales de este trabajo investigativo, ya que ayudo a entender lo sucedido con la estructura de los cubos, datos de resistencia obtenido y como las materias primas del aglomerante reaccionaron para que en la mezcla pudiera darse el proceso de fraguado y posteriormente el endurecimiento de los cubos.

Entre los productos de reacción de mayor importancia para las propiedades mencionadas anteriormente esta la etringita, la presencia de carbonato de calcio como producto, las geles de CSH (tobermorita) y la presencia de Silicato tricalcico (alita).

A partir de los datos promedios de resistencia y mediante la gráfica de los efectos principales se determinó como formulación optima la P.24 formada por 100% P, 0% CBCA, 35% C y 5% SAN y como segunda mejor la P.15 formada por 50%P, 50% CBCA, 40%C y 6% de SAN estando en la clasificación de bloque BE-2 y bloque BNE respectivamente lo cual indica que cumple con la norma (NTON-12-008-09, 2011).

En base a las observaciones realizadas al aplicar la fenolftaleína en la superficie y el interior de los cubos se pudo determinar que los morteros de la formulación P.15 presentan un mejor comportamiento al efecto de la carbonatación debido a que tanto en su superficie como el interior de los mismos la carbonatación se presentó en pequeñas cantidad, siendo en algunos casos difícil medir el avance de la misma.

Por otro lado se puede decir que los morteros de la formulación P.24 son propensos al ataque de CO_2 lo cual puede ocasionar fisuras o el deterioro acelerado de los morteros, algo que fue notorio en los cubos de esta formulación, además la profundidad de carbonatación alcanzo los 5cm en los bordes de estos.

IX. Recomendaciones

- Determinar la relación de a/l adecuada para cada una de las mezclas, con el propósito de mejorar los resultados de RMC.
- Estudiar el efecto de diferentes niveles de temperatura de curado sobre las propiedades físicas y químicas de las mezclas cementantes estudiadas.
- Utilizar otros tipos de técnicas de caracterización de las mezclas para así conocer con certeza los productos de reacción formados.
- Utilizar agentes químicos que ayuden a mejorar el tiempo de fraguado inicial y final de los cementos puzolánicos.
- Analizar el efecto de la carbonatación en periodos de tiempo prolongados (1 a 2 años).

X. Nomenclatura

Unidades de medida.

μm: micrómetros

mm: milímetros.

cm: centímetros

cm⁻¹: centímetro a la menos uno

g: gramos

kg: kilogramos

°C: grados Celsius

MPa: Mega Pascal

Materiales.

CBCA: Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar

P: Pumicita

C: Hidróxido de Calcio/Cal [Ca(OH)₂]

SAN: Sulfato de Aluminio y Sodio [AlNa(SO₄)₂]

CS: Carbonato de Sodio (Na₂CO₃)

a/l: agua/ligante

Productos de reacción

Et: etringita (3CaSO₄.3CaO.Al₂O₃.32H₂O)

Tob: Tobertomita (3CaO.6SiO₂.5H₂O)

Vat: Vaterita (CaCO₃)

CCO: Carbonato de Calcio (CaCO₃)

C₃S: Silicato tricalcico/ Alita (3CaO.SiO₃)

SiO₄: Silicato

Abreviaturas

P.: Formulación

Fop: Formulación optima

P.15 Formulación pasta 15

P.24: Formulación pasta 24

D.S: Desviación Estándar

D1, D2, D3: Diámetros de cada una de las medidas

M1, M2, M3: Resistencia de cada medida

P_{sat}: Peso saturado

P_{sec}: Peso seco

M_{Total}: Masa total

M_{seca}: Masa seca

Prom: Promedio

RMC: Resistencia Mecánica a la Compresión

FIQ: Facultad de Ingeniería Química.

FTC: Facultad de Tecnología de la Construcción

RUSB: Recinto Universitario Simón Bolívar

RUPAP: Recinto Universitario Pedro Aráuz

UNI: Universidad Nacional de Ingeniería

BE-2: Bloque Estructural 2

BNE: Bloques no Estructural.

NTON: Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense

ASTM: American Society of Testing Materials

Técnica de Caracterización

FT-IR: Espectroscopia Infrarroja por transformada de Fourier

XI. Bibliografía

- Anónimo. (06 de Febrero de 2014). Estudia IPN el uso de bagazo de caña para hacer concreto hidráulico. *La Jornada* .
- Arias, E., & Mercado, C. (2015). Obtención de un cemento base Pumicita-Hidróxido de Calcio activado alcalinamente con sulfato de sodio. *Universidad Nacional de Ingeniería* .
- ASTM-C128. (s.f.). Método de ensayo. Determinación de la densidad, densidad relativa y absorción de agua de agregado fino. *Norma Técnica Guatemalteca*.
- ASTM-C-136. (2006). Método de Ensayo. Análisis granulométrico por tamices de agregado fino y grueso. *Norma Técnica Guatemalteca*.
- ASTM-C-1437. (2007). Método de Ensayo. Determinación del flujo en morteros de cemento hidráulico. *Norma Técnica Guatemalteca* .
- ASTM-C-187-11E1. (s.f.). Determinación de la cantidad de agua para obtener la consistencia normal de la pasta de cemento hidráulico. *Norma Técnica Guatemalteca* .
- ASTM-C-191. (2008). Determinación del tiempo fraguado del cemento hidráulico usando la aguja de Vicat. *Norma Técnica Guatemala*.
- CALINDRA, G. (2011). *calindra.com*. Obtenido de calindra.com:
<http://calindra.com/proceso/productos-calindra/>
- Carmona Durán, P. (2011). Evaluación mecánica de pastas de cementos de cementos modificados con Escorias de horno de arco eléctrico y Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar. *Universidad Veracruzana* .
- Castro, C. (2014). Valorización de la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar proveniente del Ingenio Monte Rosa mediante activación alcalina para la síntesis de geopolímeros. *Univesidad Nacional de Ingeniería*.
- Christian, G. D. (2009). *Química Analítica*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Djwantor, H., Chua, C., Cheak, H. L., & Carrie, H. L. (2008). Strength and Setting Times of Low Calcium Fly Ash-based Geopolymer Mortar. *Canadian Center of Science and Education*.
- Escalante García, J. I. (2002). Materiales alternativos al cemento Portland. *Avance y Perspectiva vol. 21*.
- España, I. G. (2012). *IGME*. Obtenido de IGME:
<http://www.igme.es/PanoramaMinero/actual/PPOMEZ%2012.pdf>

- Galán García, I. (2011). Carbonatación del hormigón: Combinación CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambios de pH . *Universidad Complutenses de Madrid*, 3.
- Gómez González, A. (2009). Caracterización y utilización de puzolanas como aditivos minerales activos en cemento. Aplicación en viviendas de bajo coste. *Universidad Politécnica de Valencia*.
- González, C., Montano, Á., & Castro, D. (2012). Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez , utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto. *Red de Revistas Científicas de América Latina y El Caribe, España y Portugal*, 61.
- INEN-242. (1997-02). Cal Hidratada: Determinación de la consistencia. *Norma Técnica Ecuatoriana*.
- Krivenko, P., Shi, C., & Roy, D. (2006). *Alkali-Activated Cements and Concrets* . New York, USA: Taylor& Francis group .
- López, E., & Molina, J. (2014). Síntesis y Caracterización Físico-Mecánica de Geopolímeros a partir de Pumicita . *Universidad Nacional de Ingeniería* .
- Montani, R. (2000). La carbonatación, enemigo olvidado del concreto . *Revista Construcción y Tecnología*.
- NTON-12-008-09. (2011). Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense: Frabricación de Bloques de Concreto. *Comisión Nacional de Normalización Técnica y Calidad, Ministerio de Fomento, industria y Comercio-Nicaragua* .
- Piqué, T., & Vásquez, A. (2012). Uso de la Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo* , 62-71.
- Rivera, G. (28 de Julio de 2016). Obtenido de Agregados para morteros y concretos: <ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/geanrilo/docs/FIC%20y%20GEOTEC%20SEM%20%20de%202010/Tecnologia%20del%20Concreto%20-%20%20PDF%20ver.%20%202009/Cap.%2002%20-%20Agregados%20para%20mortero%20y%20concreto.pdf>
- Roca, G., Sánchez, C., Olivares, E., & Barbosa, L. (2006). Caracterización del Bagazo de Caña de Azucar. Partel: Características Físicas . *Revista de Ingeniería de Construcción* .
- Serrano Martínez, J. L. (s.f.). Espectroscopía Infrarroja 1 Fundamentos . *Curso: Instrumentación y métodos de análisis químico* .
- Vásquez, T., & Blanco, M. (1981). Tabla de frecuencias y espectros de absorción infrarroja de compuestos relacionados con la química del cemento. *Materiales de Construcción*.

Vásquez, T., & Gauna, R. d. (1980). Contribución al estudio de las reacciones de hidratación del cemento portland por espectroscopía infrarroja. *Materiales de Contrucción*.

Vidaud, I., & Vidaud, E. (2013). La Carbonatación en el cemento reforzado . *Revista del Instituto Mexicano de Cemento y Concreto* , 1-4.

Zúniga, Z. (2014). Microestructuras y productos de reacción de cemento activado alcalinamente base Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar-Aluminato de Calcio. *Universidad Nacional de Ingeniería*.

XII. Anexos

Anexo A Tablas

En la tabla A-1 se presentan las cantidades utilizadas para elaborar 6 cubos dadas las dimensiones de los moldes utilizados, los datos están en gramos para todos los materiales.

Tabla A- 1 Cantidad de material utilizado en cada una de las formulaciones planteadas

Formulación	P	CBCA	Cal	AlNa(SO₄)₂	Total	Arena
P.1	0.00	297.00	33.00	0.00	330.00	990.00
P.2	0.00	264.00	66.00	9.90	330.00	990.00
P.3	0.00	231.00	99.00	13.20	330.00	990.00
P.4	0.00	214.50	115.50	16.50	330.00	990.00
P.5	0.00	198.00	132.00	19.80	330.00	990.00
P.6	74.25	222.75	33.00	0.00	330.00	990.00
P.7	66.00	198.00	66.00	9.90	330.00	990.00
P.8	57.75	173.25	99.00	13.20	330.00	990.00
P.9	53.63	160.88	115.50	16.50	330.00	990.00
P.10	49.50	148.50	132.00	19.80	330.00	990.00
P.11	148.50	148.50	33.00	0.00	330.00	990.00
P.12	132.00	132.00	66.00	9.90	330.00	990.00
P.13	115.50	115.50	99.00	13.20	330.00	990.00
P.14	107.25	107.25	115.50	16.50	330.00	990.00
P.15	99.00	99.00	132.00	19.80	330.00	990.00
P.16	222.75	74.25	33.00	0.00	330.00	990.00
P.17	198.00	66.00	66.00	9.90	330.00	990.00
P.18	173.25	57.75	99.00	13.20	330.00	990.00
P.19	160.88	53.63	115.50	16.50	330.00	990.00
P.20	148.50	49.50	132.00	19.80	330.00	990.00
P.21	297.00	0.00	33.00	0.00	330.00	990.00
P.22	264.00	0.00	66.00	9.90	330.00	990.00
P.23	231.00	0.00	99.00	13.20	330.00	990.00
P.24	214.50	0.00	115.50	16.50	330.00	990.00
P.25	198.00	0.00	132.00	19.80	330.00	990.00
Total	3,011.25	3011.25	2,227.50	297.00	8250.00	24,750.00

En la tabla A-2 se muestran los resultados globales del ensayo de fluidez, donde los diámetros están en cm.

Tabla A- 2 Resultados totales del ensayo de fluidez

Formulación	D1	D2	D3	Dpf	% de Fluidez
P.1	11	12	12	11.67	19.05
P.2	13	12.5	12	12.50	27.55
P.3	12.5	12	12	12.17	24.15
P.4	11	12	13	12.00	22.45
P.5	14	12.5	13	13.17	34.35
P.6	15	16.6	15	15.53	58.50
P.7	16	15.5	17	16.17	64.97
P.8	17	15	16	16.00	63.27
P.9	15	15	14.5	14.83	51.36
P.10	10	14	15	13.00	32.65
P.11	18	19	18.5	18.50	88.78
P.12	11	14	14.5	13.17	34.35
P.13	10	12.5	13	11.83	20.75
P.14	11.5	12.5	14	12.67	29.25
P.15	11	13	14	12.67	29.25
P.16	22	20	23	21.67	121.09
P.17	15.5	15	16.5	15.67	59.86
P.18	15	16.5	15	15.50	58.16
P.19	10	12.5	13	11.83	20.75
P.20	10	12	11.5	11.17	13.95
P.21	24	27	25	25.33	158.50
P.22	17	18	19	18.00	83.67
P.23	16.5	18	18.5	17.67	80.27
P.24	13	14	14.5	13.83	41.16
P.25	12	12	10	11.33	15.65

La tabla A-3 presenta los datos de peso de las tres mediciones en kg este peso fue tomada a la edad de curado de 28 días.

Tabla A- 3 Peso de los cubos a edad de 28 días

Formulación	Peso 1	Peso 2	Peso 3	Promedio	DS
P.1	0.137	0.14	0.135	0.14	0.0025166
P.2	0.185	0.189	0.192	0.19	0.0035119
P.3	0.2036	0.2249	0.2213	0.22	0.0114013
P.4	0.2222	0.2195	0.227	0.22	0.0037987
P.5	0.1931	0.2197	0.2078	0.21	0.0133245
P.6	0.1854	0.1978	0.2082	0.20	0.0114146
P.7	0.2079	0.2204	0.1995	0.21	0.0105168
P.8	0.2105	0.2101	0.2197	0.21	0.0054308
P.9	0.2139	0.2074	0.213	0.21	0.0035218
P.10	0.2207	0.2246	0.2224	0.22	0.0019553
P.11	0.2239	0.2261	0.2237	0.22	0.0013317
P.12	0.213	0.2358	0.2223	0.22	0.0114643
P.13	0.217	0.2269	0.2238	0.22	0.0050639
P.14	0.2196	0.2219	0.2228	0.22	0.0016503
P.15	0.2264	0.2318	0.2297	0.23	0.0027221
P.16	0.2096	0.2013	0.2225	0.21	0.0106829
P.17	0.2214	0.2118	0.2295	0.22	0.0088606
P.18	0.2569	0.2374	0.235	0.24	0.0120112
P.19	0.2241	0.2262	0.2276	0.23	0.0017616
P.20	0.2184	0.2265	0.2227	0.22	0.0040526
P.21	0.2149	0.1898	0.1929	0.20	0.0136847
P.22	0.225	0.2177	0.2177	0.22	0.0042147
P.23	0.2285	0.2274	0.2217	0.23	0.0036501
P.24	0.2285	0.2274	0.2217	0.23	0.0036501
P.25	0.2487	0.25	0.2333	0.24	0.0092892

En la tabla A-4 se muestran los datos obtenidos en cada una de las lecturas para la determinación del tiempo de fraguado inicial y final de las dos pastas en estudio, también es importante señalar que las mediciones se realizaron cada 15 minutos y los datos de tiempo están en h y la penetración en mm.

Tabla A- 4 Mediciones del tiempo de fraguado de las pastas P.15 y P.24

P.15			P.24		
N° de lectura	Tiempo	Penetración	N° de lectura	Tiempo	Penetración
1	0.5	43	1	0.5	49
2	0.75	41	2	0.75	48
3	1	40	3	1	48
4	1.25	39	4	1.25	47
5	1.5	39	5	1.5	47
6	1.75	38	6	1.75	46
7	2	38	7	2	46
8	2.25	37	8	2.25	45
9	2.5	33	9	2.5	45
10	2.75	31	10	2.75	45
11	3	28	11	3	44
12	3.25	27	12	3.25	44
13	3.5	26	13	3.5	43
14	3.75	21	14	3.75	43
15	4	20	15	4	42
16	4.25	19	16	4.25	42
17	4.5	19	17	4.5	41
18	4.75	18	18	4.75	36
19	5	17	19	5	31
20	5.25	17	20	5.25	30
21	5.5	16	21	5.5	29
22	5.75	15	22	5.75	27
23	6	15	23	6	25
24	21	0	24	6.25	25
25	28	0	25	28	0

La tabla A-5 se presenta los datos totales de RMC en MPa a las dos edades de curado en estudio

Tabla A- 5 Resultados del ensayo de RMC para todas las formulaciones

Formulación	28 días de curado					42 días de curado				
	M1	M2	M3	Prom	DS	M1	M2	M3	Prom	DS
P.1	0.36	0.47	0.50	0.44	0.07	0.38	0.45	0.48	0.44	0.05
P.2	1.15	1.81	1.29	1.42	0.35	1.34	1.50	1.43	1.42	0.08
P.3	3.77	6.12	6.34	5.41	1.42	7.00	4.60	2.59	4.73	2.21
P.4	6.74	6.89	6.89	6.84	0.09	7.43	4.62	3.93	5.33	1.85
P.5	1.59	3.40	5.67	3.55	2.05	3.07	3.90	3.67	3.55	0.43
P.6	1.41	1.24	1.02	1.22	0.20	0.71	0.67	0.98	0.79	0.17
P.7	3.46	3.36	3.33	3.38	0.07	1.69	2.67	2.48	2.28	0.52
P.8	5.19	4.90	4.72	4.94	0.24	4.27	3.64	4.34	4.09	0.39
P.9	5.10	5.43	5.46	5.33	0.20	4.33	3.72	3.90	3.98	0.31
P.10	5.02	6.33	4.05	5.13	1.14	5.74	5.34	4.14	5.07	0.83
P.11	1.03	1.15	1.09	1.09	0.06	0.71	0.97	1.07	0.91	0.19
P.12	3.76	3.98	3.77	3.84	0.12	5.03	2.52	4.21	3.92	1.28
P.13	4.59	3.72	4.90	4.40	0.61	4.53	5.10	4.83	4.82	0.28
P.14	5.19	4.95	3.62	4.59	0.84	5.24	5.36	4.09	4.90	0.70
P.15	6.60	5.43	5.24	5.76	0.74	5.15	4.72	4.33	4.73	0.41
P.16	1.22	1.17	1.19	1.20	0.03	0.55	0.71	0.86	0.71	0.16
P.17	3.59	3.12	4.10	3.60	0.49	2.62	3.69	3.55	3.29	0.58
P.18	3.59	6.93	5.65	5.39	1.69	5.76	4.91	6.26	5.64	0.68
P.19	4.34	3.90	4.41	4.22	0.28	5.48	5.00	5.79	5.42	0.40
P.20	3.96	2.88	2.64	3.16	0.71	4.03	3.74	4.15	3.98	0.21
P.21	0.34	0.47	0.52	0.44	0.09	0.93	1.22	0.43	0.86	0.40
P.22	1.59	1.40	1.36	1.45	0.12	2.09	1.48	0.60	1.39	0.75
P.23	3.09	3.31	2.95	3.11	0.18	3.55	3.15	3.07	3.26	0.26
P.24	5.65	8.20	7.69	7.18	1.35	10.36	10.36	4.53	8.42	3.36
P.25	8.79	8.29	8.29	8.46	0.29	10.26	7.64	6.43	8.11	1.96

Anexo B Figuras

Obtención del compósito

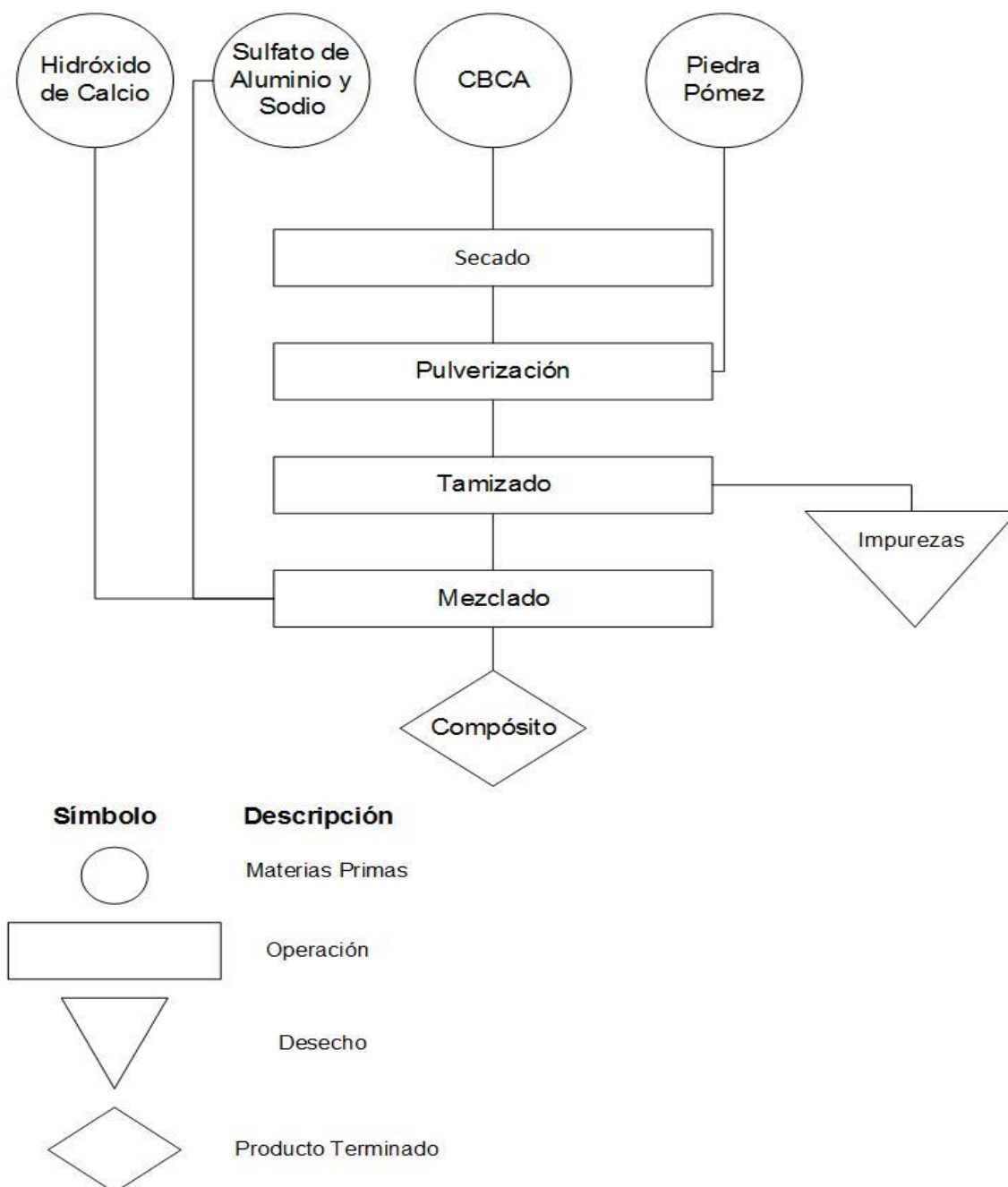


Figura B- 1 Flujograma de obtención de compósito

Figuras de equipos utilizados en el proceso experimental



Figura B- 2 Maquina de los Ángeles para el desgaste de materiales



Figura B- 3 Mesa de Fluidez



Figura B- 4 Mezcladora para realización de mezclas



Figura B- 5 Aparato de Vicat para el ensayo de determinación del tiempo fraguado



Figura B- 6 Mufla utilizada para el proceso de curado térmico



Figura B- 7 Maquina para el ensayo de RMC

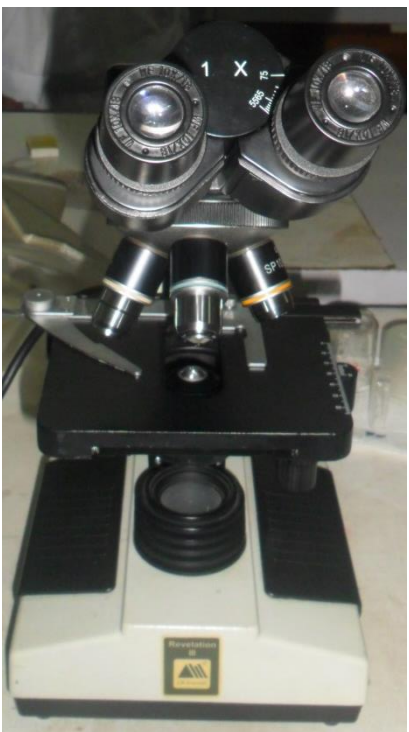


Figura B- 8 Microscopio para la caracterización física de las materias



Figura B- 9 Espectrómetro para el Análisis del FT-IR



Figura B- 10 Agitador mecánico y juego de tamices



Figura B-11 Metao utilizado para realización del corte transversal de los cubos